

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЬЦИНА

# АНАЛИТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Практикум для студентов  
нехимических направлений и специальностей

Рекомендовано методическим советом УрФУ  
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся  
по программе бакалавриата по направлениям подготовки  
020400 «Биология», 022000 «Экология и природопользование»,  
222900 «Нанотехнологии и микросистемная техника»,  
011200 «Физика», 221700 «Стандартизация и метрология»,  
222000 «Инноватика»

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2013

УДК 543(076.5)  
ББК 24.4я73  
А64

Рецензенты:  
кафедра физики и химии  
Уральского государственного экономического университета  
(заведующий кафедрой доктор химических наук,  
профессор Н. Ю. С т о ж к о);  
Е. П. С о б н а, кандидат химических наук  
(Уральский научно-исследовательский институт метрологии)

Аналитическая химия : практикум для студентов нехи-  
А64 мических специальностей : [учеб. пособие] / [сост. Н. В. Ла-  
киза] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер.  
ун-т. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2013. — 130 с.  
ISBN 978-5-7996-1000-5

В учебном пособии приведены решения типовых задач по основным разделам аналитической химии. Рассмотрены основные закономерности равновесий и протекания реакций (окислительно-восстановительных, комплексообразования и осаждения), а также основы химических методов анализа, включая титриметрический и гравиметрический методы. Каждый раздел сопровождается подробным теоретическим введением, которое включает сведения, необходимые для самостоятельного решения задач. Пособие содержит контрольные задания, предназначенные для закрепления теоретического материала и формирования практических навыков по дисциплине «Аналитическая химия».

Учебное пособие предназначено студентам нехимических специальностей классических университетов.

УДК 543(076.5)  
ББК 24.4я73

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Аналитическая химия — это наука, развивающая теоретические основы химического анализа веществ и материалов и разрабатывающая методы определения химического состава вещества и его строения.

Взаимосвязь аналитической химии с другими науками, а также с отраслями промышленности является одной из существенных особенностей этой науки. Аналитическая химия тесно связана с физикой, неорганической, органической, физической и коллоидной химией, электрохимией, химической термодинамикой, теорией растворов, метрологией, теорией информации. Методами аналитической химии пользуются также биологические, медицинские и технические науки. Не менее важную роль играет аналитическая химия в геологии, геохимии, сельском хозяйстве, фармацевтической, лакокрасочной, нефтехимической и многих других отраслях промышленности.

Теоретическую основу аналитической химии составляют фундаментальные законы естествознания, такие как Периодический закон Д. И. Менделеева, законы сохранения массы вещества и энергии, постоянства состава вещества, действия масс и др.

В основе аналитической химии лежит химический анализ — совокупность действий, позволяющих идентифицировать качественный и количественный состав анализируемого объекта.

В соответствии с двусторонним характером решаемых задач аналитическая химия разделяется на две основные части: качественный и количественный анализ. Задача качественного анализа — обнаружить, какие именно элементы или их соединения входят в состав анализируемого материала. Качественный анализ обычно предшествует количественному, цель которого — определение количественных соотношений между компонентами, найденными при качественном исследовании.

При изучении количественного анализа значительное внимание уделяется изучению разнообразных методов вычислений.

В учебном пособии изложены теоретические основы описания химического равновесия реакций окисления — восстановления, комплексообразования и осаждения, а также основы классических методов анализа, а именно титриметрического и гравиметрического.

Каждый раздел сопровождается подробным теоретическим введением и решением типовых задач. Пособие содержит контрольные задания, предназначенные для закрепления теоретического материала и формирования практических навыков по дисциплине «Аналитическая химия», учебная программа которой предусматривает выполнение следующих контрольных работ:

1) построение кривой кислотно-основного титрования (контрольная работа 1);

2) вычисление результатов в методе кислотно-основного титрования (контрольная работа 2);

3) равновесие реакций окисления — восстановления и комплексообразования; вычисление результатов окислительно-восстановительного и комплексонометрического титрования (контрольная работа 3);

4) гетерогенное равновесие в системе раствор — осадок; вычисление результатов гравиметрического метода анализа (контрольная работа 4).

Номера задач контрольных работ представлены в табл. 1. Номер варианта соответствует номеру контрольного задания на практических занятиях.

Т а б л и ц а 1

**Номера задач контрольных работ**

Вариант	Номера задач контрольных работ			
	1	2	3	4
1.	366 а	156, 186, 246, 276	1, 31, 216, 306, 336	66, 96, 126, 416, 446
2.	367 а	157, 187, 247, 277	2, 32, 217, 307, 337	67, 97, 127, 417, 447

Продолжение табл. 1

Вариант	Номера задач контрольных работ			
	1	2	3	4
3.	368 а	158, 188, 248, 278	3, 33, 218, 308, 338	68, 98, 128, 418, 448
4.	369 а	159, 189, 249, 279	4, 34, 219, 309, 339	69, 99, 129, 419, 449
5.	370 а	160, 190, 250, 280	5, 35, 220, 310, 340	70, 100, 130, 420, 450
6.	371 а	161, 191, 251, 281	6, 36, 221, 311, 341	71, 101, 131, 421, 451
7.	372 а	162, 192, 252, 282	7, 37, 222, 312, 342	72, 102, 132, 422, 452
8.	373 а	163, 193, 253, 283	8, 38, 223, 313, 343	73, 103, 133, 423, 453
9.	374 а	164, 194, 254, 284	9, 39, 224, 314, 344	74, 104, 134, 424, 454
10.	375 а	165, 195, 255, 285	10, 40, 225, 315, 345	75, 105, 135, 425, 455
11.	376 а	166, 196, 256, 286	11, 41, 226, 316, 346	76, 106, 136, 426, 456
12.	377 а	167, 197, 267, 287	12, 42, 227, 317, 347	77, 107, 137, 427, 457
13.	378 а	168, 198, 268, 288	13, 43, 228, 318, 348	78, 108, 138, 428, 458
14.	379 а	169, 199, 259, 289	14, 44, 229, 319, 349	79, 109, 139, 429, 459
15.	380 а	170, 200, 260, 290	15, 45, 230, 320, 350	80, 110, 140, 430, 460

Продолжение табл. 1

Вариант	Номера задач контрольных работ			
	1	2	3	4
16.	381 а	171, 201, 261, 291	16, 46, 231, 321, 351	81, 111, 141, 431, 461
17.	382 а	172, 202, 262, 292	17, 47, 232, 322, 352	82, 112, 142, 432, 462
18.	383 а	173, 203, 263, 293	18, 48, 233, 323, 353	83, 113, 143, 433, 463
19.	384 а	174, 204, 264, 294	19, 49, 234, 324, 354	84, 114, 144, 434, 464
20.	385 а	175, 205, 265, 295	20, 50, 235, 325, 355	85, 115, 145, 435, 465
21.	386 а	176, 206, 266, 296	21, 51, 236, 326, 356	86, 116, 146, 436, 466
22.	387 а	177, 207, 267, 297	22, 52, 237, 327, 357	87, 117, 147, 437, 467
23.	388 а	178, 208, 268, 298	23, 53, 238, 328, 358	88, 118, 148, 438, 468
24.	389 а	179, 209, 269, 299	24, 54, 239, 329, 359	89, 119, 149, 439, 469
25.	390 а	180, 210, 270, 300	25, 55, 240, 330, 360	90, 120, 150, 440, 470
26.	391 а	181, 211, 271, 301	26, 56, 241, 331, 361	91, 121, 151, 441, 471
27.	392 а	182, 212, 272, 302	27, 57, 242, 332, 362	92, 122, 152, 442, 472
28.	393 а	183, 213, 273, 303	28, 58, 243, 333, 363	93, 123, 153, 443, 473

Продолжение табл. 1

Вариант	Номера задач контрольных работ			
	1	2	3	4
29.	394 а	184, 214, 274, 304	29, 59, 244, 334, 364	94, 124, 154, 444, 474
30.	395 а	185, 215, 275, 305	30, 60, 245, 335, 365	95, 125, 155, 445, 475
31.	396 а	160, 191, 253, 284	1, 61, 222, 315, 346	67, 98, 129, 427, 458
32.	397 а	161, 192, 254, 285	2, 62, 223, 316, 347	68, 99, 130, 428, 459
33.	398 а	162, 193, 255, 286	3, 63, 224, 317, 348	69, 100, 131, 429, 460
34.	399 а	163, 194, 256, 287	4, 64, 225, 318, 349	70, 101, 132, 430, 461
35.	400 а	164, 195, 257, 288	5, 65, 226, 319, 350	71, 102, 133, 431, 462
36.	401 а	165, 196, 258, 289	6, 31, 227, 320, 351	72, 103, 134, 432, 463
37.	402 а	166, 197, 259, 290	7, 32, 228, 321, 352	73, 104, 135, 433, 464
38.	403 а	167, 198, 260, 291	8, 33, 229, 322, 353	74, 105, 136, 434, 465
39.	404 а	168, 199, 261, 292	9, 34, 230, 323, 354	75, 106, 137, 435, 466
40.	405 а	169, 200, 262, 293	10, 35, 231, 324, 355	76, 107, 138, 436, 467
41.	406 а	170, 201, 263, 294	11, 36, 232, 325, 356	77, 108, 139, 437, 468

Продолжение табл. 1

Вариант	Номера задач контрольных работ			
	1	2	3	4
42.	407 а	171, 202, 264, 295	12, 37, 233, 326, 357	78, 109, 140, 438, 469
43.	408 а	172, 203, 265, 296	13, 38, 234, 327, 358	79, 110, 141, 439, 470
44.	409 а	173, 204, 266, 297	14, 39, 235, 328, 359	80, 111, 142, 440, 471
45.	410 а	174, 205, 267, 298	15, 40, 236, 329, 360	81, 112, 143, 441, 472
46.	411 а	175, 206, 268, 299	16, 41, 237, 330, 361	82, 113, 144, 442, 473
47.	412 а	176, 207, 269, 300	17, 42, 238, 331, 362	83, 114, 145, 443, 474
48.	413 а	177, 208, 270, 301	18, 43, 239, 332, 363	84, 115, 146, 444, 475
49.	414 а	178, 209, 271, 302	19, 44, 240, 333, 364	85, 116, 147, 445, 446
50.	415 а	179, 210, 272, 303	20, 45, 241, 334, 365	86, 117, 148, 416, 447
51.	366 б	180, 211, 273, 304	21, 46, 242, 335, 336	87, 118, 149, 417, 448
52.	367 б	181, 212, 274, 305	22, 47, 243, 306, 337	88, 119, 150, 418, 449
53.	368 б	182, 213, 275, 276	23, 48, 244, 307, 338	89, 120, 151, 419, 450
54.	369 б	183, 214, 246, 277	24, 49, 245, 308, 339	90, 121, 152, 420, 451



Продолжение табл. 1

Вариант	Номера задач контрольных работ			
	1	2	3	4
55.	370 б	184, 215, 247, 278	25, 50, 216, 309, 340	91, 122, 153, 421, 452
56.	371 б	185, 186, 248, 279	26, 51, 217, 310, 341	92, 123, 154, 422, 453
57.	372 б	156, 187, 249, 280	27, 52, 218, 311, 342	93, 124, 155, 423, 454
58.	373 б	157, 188, 250, 281	28, 53, 219, 312, 343	94, 125, 126, 424, 455
59.	374 б	158, 189, 251, 282	29, 54, 220, 313, 344	95, 96, 127, 425, 456
60.	375 б	159, 190, 252, 283	30, 55, 221, 314, 345	66, 97, 128, 426, 457
61.	376 б	164, 196, 260, 292	1, 56, 228, 324, 356	68, 100, 132, 438, 470
62.	377 б	165, 197, 261, 293	2, 57, 229, 325, 357	69, 101, 133, 439, 471
63.	378 б	166, 198, 262, 294	3, 58, 230, 326, 358	70, 102, 134, 440, 472
64.	379 б	167, 199, 263, 295	4, 59, 231, 327, 359	71, 103, 135, 441, 473
65.	380 б	168, 200, 264, 296	5, 60, 232, 328, 360	72, 104, 136, 442, 474
66.	381 б	169, 201, 265, 297	6, 61, 233, 329, 361	73, 105, 137, 443, 475
67.	382 б	170, 202, 266, 298	7, 62, 234, 330, 362	74, 106, 138, 444, 446

Продолжение табл. 1

Вариант	Номера задач контрольных работ			
	1	2	3	4
68.	383 б	171, 203, 267, 299	8, 63, 235, 331, 363	75, 107, 139, 445, 447
69.	384 б	172, 204, 268, 300	9, 64, 236, 332, 364	76, 108, 140, 416, 448
70.	385 б	173, 205, 269, 301	10, 65, 237, 333, 365	77, 109, 141, 417, 449
71.	386 б	174, 206, 270, 302	11, 31, 238, 334, 336	78, 110, 142, 418, 450
72.	387 б	175, 207, 271, 303	12, 32, 239, 335, 337	79, 111, 143, 419, 451
73.	388 б	176, 208, 272, 304	13, 33, 240, 306, 338	80, 112, 144, 420, 452
74.	389 б	177, 209, 273, 305	14, 34, 241, 307, 339	81, 113, 145, 421, 453
75.	390 б	178, 210, 274, 276	15, 35, 242, 308, 340	82, 114, 146, 422, 454
76.	391 б	179, 211, 275, 277	16, 36, 243, 309, 341	83, 115, 147, 423, 455
77.	392 б	180, 212, 246, 278	17, 37, 244, 310, 342	84, 116, 148, 424, 456
78.	393 б	181, 213, 247, 279	18, 38, 245, 311, 343	85, 117, 149, 425, 457
79.	394 б	182, 214, 248, 280	19, 39, 216, 312, 344	86, 118, 150, 426, 458
80.	395 б	183, 215, 249, 281	20, 40, 217, 313, 345	87, 119, 151, 427, 459

Продолжение табл. 1

Вариант	Номера задач контрольных работ			
	1	2	3	4
81.	396 б	184, 186, 250, 282	21, 41, 218, 314, 346	88, 120, 152, 428, 460
82.	397 б	185, 187, 251, 283	22, 42, 219, 315, 347	89, 121, 153, 429, 461
83.	398 б	156, 188, 252, 284	23, 43, 220, 316, 348	90, 122, 154, 430, 462
84.	399 б	157, 189, 253, 285	24, 44, 221, 317, 349	91, 123, 155, 431, 463
85.	400 б	158, 190, 254, 286	25, 45, 222, 318, 350	92, 124, 126, 432, 464
86.	401 б	159, 191, 255, 287	6, 46, 223, 319, 351	93, 125, 127, 433, 465
87.	402 б	160, 192, 256, 288	27, 47, 224, 320, 352	94, 96, 128, 434, 466
88.	403 б	161, 193, 257, 289	28, 48, 225, 321, 353	95, 97, 129, 435, 467
89.	404 б	162, 194, 258, 290	29, 49, 226, 322, 354	66, 98, 130, 436, 468
90.	405 б	163, 195, 259, 291	30, 50, 227, 323, 355	67, 99, 131, 437, 469
91.	406 б	168, 201, 267, 300	1, 51, 234, 333, 337	69, 102, 135, 420, 454
92.	407 б	169, 202, 268, 301	2, 52, 235, 334, 338	70, 103, 136, 421, 455
93.	408 б	170, 203, 269, 302	3, 53, 236, 335, 339	71, 104, 137, 422, 456

## О к о н ч а н и е   т а б л . 1

Вариант	Номера задач контрольных работ			
	1	2	3	4
94.	409 б	171, 204, 270, 303	4, 54, 237, 306, 340	72, 105, 138, 423, 457
95.	410 б	172, 205, 271, 304	5, 55, 238, 307, 341	73, 106, 139, 424, 458
96.	411 б	173, 206, 272, 305	6, 56, 239, 308, 342	74, 107, 140, 425, 459
97.	412 б	174, 207, 273, 276	7, 57, 240, 309, 343	75, 108, 141, 426, 460
98.	413 б	175, 208, 274, 277	8, 58, 241, 310, 344	76, 109, 142, 427, 461
99.	414 б	176, 209, 275, 278	9, 59, 242, 311, 345	77, 110, 143, 428, 462
100.	415 б	177, 210, 246, 279	10, 60, 243, 312, 346	78, 111, 144, 429, 463
101.	366 а	178, 211, 247, 280	11, 61, 244, 313, 347	79, 112, 145, 430, 464
102.	367 а	179, 212, 248, 281	12, 62, 245, 314, 348	80, 113, 146, 431, 465
103.	368 а	180, 213, 249, 282	13, 63, 216, 315, 349	81, 114, 147, 432, 466
104.	369 а	181, 214, 250, 283	14, 64, 217, 316, 350	82, 115, 148, 433, 467
105.	370 а	182, 215, 251, 284	15, 65, 218, 317, 351	83, 116, 149, 434, 468

При решении контрольных заданий следует пользоваться справочными данными, представленными, например, в книге Ю. Ю. Лурье «Справочник по аналитической химии».

Автор признателен доценту кафедры аналитической химии Института естественных наук Уральского федерального университета, кандидату химических наук А. Л. Подкорытову за ценные замечания и советы, способствующие улучшению рукописи.

# 1. ХИМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ

## Основные положения

В основе многих методов качественного обнаружения и количественного определения лежат химические реакции. Значительная их часть протекает не до конца, по мере накопления продуктов реакции создаются условия для протекания реакции в противоположном направлении.

Химические реакции, которые при одних и тех же условиях могут идти в противоположных направлениях, называются *обратимыми*.

В общем виде уравнение обратимой химической реакции можно представить схемой



Условно реакцию, протекающую слева направо, называют прямой, а справа налево — обратной.

Количественные соотношения между веществами, участвующими в обратимой химической реакции после достижения состояния равновесия, устанавливает фундаментальный закон химии — *закон действия масс*, открытый в 1864 г. норвежскими учеными К. Гульдбергом и П. Вааге. В аналитической химии закон действия масс является теоретической основой многих методов анализа.

Закон действия масс гласит: при постоянной температуре скорость химической реакции прямо пропорциональна произведению концентраций реагирующих веществ, возведенных в их стехиометрические коэффициенты.

Состояние системы, при котором скорость прямой реакции равна скорости обратной реакции, называется *химическим равновесием*. Концентрации реагентов и продуктов, отвечающих состоянию равновесия, называются равновесными.

Состояние химического равновесия количественно характеризуется константой равновесия  $K$  — постоянной величиной при данной температуре и давлении, равной отношению произведения равновесных концентраций продуктов реакции к произведению концентраций исходных веществ в степенях, равных стехиометрическим коэффициентам. Так, для равновесия (I) константа равновесия равна

$$K = \frac{[D]^d \cdot [E]^e}{[A]^a \cdot [B]^b}. \quad (1.1)$$

Уравнение (1.1) представляет собой математическую формулировку следствия из закона действия масс, которое справедливо только для идеальных систем. Реальные системы, с которыми имеют дело химики-аналитики, как правило, сильно отличаются по своим термодинамическим свойствам от идеальных.

Факторы, влияющие на равновесие в реальных системах, можно свести к двум основным группам: электростатические и химические взаимодействия.

Влияние электростатических факторов можно учесть с помощью приема, называемого *методом активностей*. Сущность этого метода состоит в том, что вместо равновесных концентраций реагирующих частиц используют величины, называемые активностями ( $a$ ). Под *активностью* иона понимают ту эффективную условную концентрацию иона, в соответствии с которой он действует в химических реакциях. Отношение активности частицы к ее равновесной концентрации

$$f_i = \frac{a_i}{[i]} \quad (1.2)$$

называется коэффициентом активности.

Коэффициенты активности ионов в растворах электролитов служат мерой электростатических взаимодействий в системе и характеризуют степень отклонения системы от идеальной. Для идеальных растворов электростатические взаимодействия пренебрежимо малы, т. е. частицы реагентов практически не взаимодей-

ствуют друг с другом, активности равны равновесным концентрациям  $a_i = [i]$  и  $f_i = 1$ . Насколько система отклоняется от идеальной, настолько коэффициент активности отличен от единицы.

Коэффициенты активности ионов зависят от величины  $\mu$ , называемой *ионной силой раствора* и вычисляемой по уравнению

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (C_i \cdot z_i^2), \quad (1.3)$$

где  $C_i$  и  $z_i$  — молярная концентрация и заряд  $i$ -го иона;  $\sum$  — сумма всех ионов, присутствующих в растворе.

Значения коэффициентов активности в зависимости от ионной силы раствора приведены в справочных таблицах [Лурье, с. 83, 87].

Мерой степени химических взаимодействий в системе служит молярная доля  $\alpha_i$ , представляющая собой отношение равновесной концентрации  $i$ -й частицы, участвующей в основной реакции, к общей концентрации  $i$ -содержащего компонента:

$$\alpha_i = \frac{[i]}{C_i}. \quad (1.4)$$

Величина молярной доли может изменяться в пределах от 0 до 1. Очевидно, что при отсутствии конкурирующих реакций  $C_i = [i]$  и  $\alpha_i = 1$ .

## РЕШЕНИЕ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

**Пример 1.** Рассчитайте ионную силу в 0,01 моль/дм<sup>3</sup> растворе нитрата кальция.

**Решение.** Ионную силу раствора рассчитываем по уравнению (1.3):

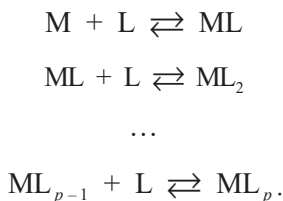
$$\begin{aligned} \mu &= \frac{1}{2} (C_{\text{Ca}^{2+}} \cdot z_{\text{Ca}^{2+}}^2 + C_{\text{NO}_3^-} \cdot z_{\text{NO}_3^-}^2) = \\ &= \frac{1}{2} (0,01 \cdot 2^2 + 0,02 \cdot (-1)^2) = 0,03 \text{ (моль/дм}^3\text{)}. \end{aligned}$$

**О т в е т:**  $\mu = 0,03$  моль/дм<sup>3</sup>.



## Равновесие реакций комплексообразования в водных растворах

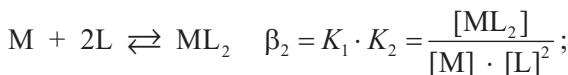
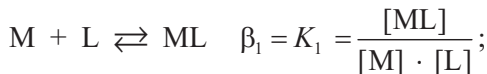
В преобладающем большинстве случаев образование комплексных соединений в растворах происходит ступенчато. Ионы металлов в растворах координируют молекулы растворителя, поэтому реакцию образования моноядерного комплексного соединения в растворе следует представлять как последовательное замещение молекул растворителя во внутренней сфере на молекулы или ионы лиганда. В разбавленных растворах активность растворителя практически постоянна, не всегда известно число молекул растворителя, сольватирующих ион, поэтому реакции комплексообразования обычно записывают в виде



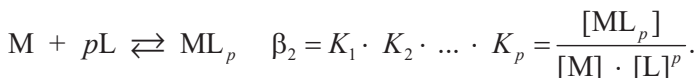
Константа равновесия каждого из этих процессов называется ступенчатой (или последовательной) константой устойчивости (образования) комплексного соединения, выражения для которой записывают следующим образом:

$$\begin{aligned}K_1 &= \frac{[ML]}{[M] \cdot [L]}; \\K_2 &= \frac{[ML_2]}{[ML] \cdot [L]}; \\&\dots \\K_p &= \frac{[ML_p]}{[ML_{p-1}] \cdot [L]}.\end{aligned}$$

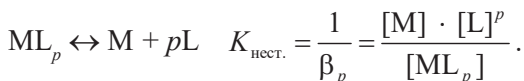
Реакции комплексообразования можно описать также суммарными равновесиями, константы которых называют общими (суммарными) константами устойчивости и обозначают  $\beta$ :



...



Иногда устойчивость комплексов характеризуют константами нестойкости, т. е. величинами, обратными константам устойчивости:



Зная константы устойчивости комплексных соединений и равновесную концентрацию свободного лиганда, можно рассчитать мольную долю иона металла и любой другой комплексной частицы в растворе:

$$\begin{aligned} \alpha_0 = \alpha_M &= \frac{[M]}{C_M} = \frac{[M]}{[M] + [ML] + [ML_2] + \dots + [ML_p]} = \\ &= \frac{1}{1 + \beta_1 \cdot [L] + \beta_2 \cdot [L]^2 + \dots + \beta_p \cdot [L]^p}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \alpha_{ML} &= \frac{[ML]}{C_M} = \frac{[ML]}{[M] + [ML] + [ML_2] + \dots + [ML_p]} = \\ &= \frac{\beta_1 \cdot [L]}{1 + \beta_1 \cdot [L] + \beta_2 \cdot [L]^2 + \dots + \beta_p \cdot [L]^p} = \beta_1 \cdot [L] \cdot \alpha_0, \end{aligned}$$

$$\alpha_2 = \alpha_{\text{ML}_2} = \frac{[\text{ML}_2]}{C_{\text{M}}} = \frac{[\text{ML}_2]}{[\text{M}] + [\text{ML}] + [\text{ML}_2] + \dots + [\text{ML}_p]} =$$

$$= \frac{\beta_2 \cdot [\text{L}]^2}{1 + \beta_1 \cdot [\text{L}] + \beta_2 \cdot [\text{L}]^2 + \dots + \beta_p \cdot [\text{L}]^p} = \beta_2 \cdot [\text{L}]^2 \cdot \alpha_0,$$

...

$$\alpha_n = \alpha_{\text{ML}_p} = \frac{[\text{ML}_p]}{C_{\text{M}}} = \frac{[\text{ML}_p]}{[\text{M}] + [\text{ML}] + [\text{ML}_2] + \dots + [\text{ML}_p]} =$$

$$= \frac{\beta_p \cdot [\text{L}]^p}{1 + \beta_1 \cdot [\text{L}] + \beta_2 \cdot [\text{L}]^2 + \dots + \beta_p \cdot [\text{L}]^p} = \beta_p \cdot [\text{L}]^p \cdot \alpha_0$$

или в общем виде:

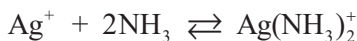
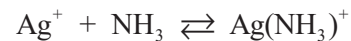
$$\alpha_i = \frac{[\text{ML}_i]}{C_{\text{M}}} = \frac{\beta_i \cdot [\text{L}]^i}{\sum_{i=0}^p \beta_i \cdot [\text{L}]^i} = \beta_i \cdot [\text{L}]^i \cdot \alpha_0. \quad (1.5)$$

Используя уравнение материального баланса, а также степень образования (мольную долю), можно рассчитать равновесные концентрации любых частиц в растворах комплексных соединений. Для упрощения расчетов равновесную концентрацию свободного лиганда принимают равной его исходной концентрации, если лиганд находится в большом избытке по отношению к иону металла.

## РЕШЕНИЕ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

**П р и м е р 1.** Какая частица преобладает в растворе, содержащем  $1 \cdot 10^{-2}$  моль/дм<sup>3</sup> серебра (I) и 1 моль/дм<sup>3</sup> аммиака?

**Р е ш е н и е.** В растворе, содержащем ионы серебра и аммиак, устанавливаются равновесия:



Из справочных таблиц [Лурье, с. 307]  $\beta_1 = 2,09 \cdot 10^3$  и  $\beta_2 = 1,70 \cdot 10^7$ . Учитывая, что  $C_{\text{NH}_3} \gg C_{\text{Ag}}$ , полагаем  $[\text{NH}_3] = C_{\text{NH}_3} = 1$  моль/дм<sup>3</sup>. Рассчитываем  $\alpha_0$ :

$$\alpha_0 = \frac{[\text{Ag}^+]}{C_{\text{Ag}}} = \frac{1}{1 + \beta_1 \cdot [\text{NH}_3] + \beta_2 \cdot [\text{NH}_3]^2} =$$

$$= \frac{1}{1 + 2,09 \cdot 10^3 \cdot 1 + 1,70 \cdot 10^7 \cdot 1^2} = 5,88 \cdot 10^{-8}$$

и далее по формуле (1.5)

$$\alpha_1 = \frac{[\text{AgNH}_3^+]}{C_{\text{Ag}}} = \beta_1 \cdot [\text{NH}_3] \cdot \alpha_0 = 2,09 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 5,88 \cdot 10^{-8} =$$

$$= 1,23 \cdot 10^{-4};$$

$$\alpha_2 = \frac{[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2^+]}{C_{\text{Ag}}} = \beta_2 \cdot [\text{NH}_3]^2 \cdot \alpha_0 = 1,70 \cdot 10^7 \cdot 1^2 \cdot 5,88 \cdot 10^{-8} = 1.$$

Таким образом, в растворе доминирует частица  $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2^+$ .

**П р и м е р 2.** Рассчитайте равновесные концентрации всех частиц в 0,01 моль/дм<sup>3</sup> растворе соли кадмия, содержащем 2 моль/дм<sup>3</sup> иодида калия.

**Р е ш е н и е.** В растворе существуют следующие равновесия:



Рассчитываем мольные доли всех частиц, присутствующих в растворе по формуле (1.5), принимая, что  $[\text{I}^-] = C_{\text{KI}} = 2$  моль/дм<sup>3</sup>, поскольку  $C_{\text{KI}} \gg C_{\text{Cd}}$ :

$$\alpha_0 = \frac{[\text{Cd}^{2+}]}{C_{\text{Cd}}} = \frac{1}{1 + \beta_1 \cdot [\text{I}^-] + \beta_2 \cdot [\text{I}^-]^2 + \beta_3 \cdot [\text{I}^-]^3 + \beta_4 \cdot [\text{I}^-]^4} =$$

$$= \frac{1}{1 + 147,9 \cdot 2 + 4,68 \cdot 10^3 \cdot 2^2 + 2,19 \cdot 10^4 \cdot 2^3 + 2,24 \cdot 10^5 \cdot 2^4} =$$

$$= 2,65 \cdot 10^{-7};$$

$$\alpha_1 = \frac{[\text{CdI}^+]}{C_{\text{Cd}}} = \beta_1 \cdot [\text{I}^-] \cdot \alpha_0 = 147,9 \cdot 2 \cdot 2,65 \cdot 10^{-7} = 7,84 \cdot 10^{-5};$$

$$\alpha_2 = \frac{[\text{CdI}_2]}{C_{\text{Cd}}} = \beta_2 \cdot [\text{I}^-]^2 \cdot \alpha_0 = 4,68 \cdot 10^3 \cdot 2^2 \cdot 2,65 \cdot 10^{-7} = 4,96 \cdot 10^{-3};$$

$$\alpha_3 = \frac{[\text{CdI}_3^-]}{C_{\text{Cd}}} = \beta_3 \cdot [\text{I}^-]^3 \cdot \alpha_0 = 2,19 \cdot 10^4 \cdot 2^3 \cdot 2,65 \cdot 10^{-7} = 4,64 \cdot 10^{-2};$$

$$\alpha_4 = \frac{[\text{CdI}_4^{2-}]}{C_{\text{Cd}}} = \beta_4 \cdot [\text{I}^-]^4 \cdot \alpha_0 = 2,24 \cdot 10^5 \cdot 2^4 \cdot 2,65 \cdot 10^{-7} = 0,950.$$

Рассчитываем равновесные концентрации всех указанных частиц:

$$[\text{Cd}^{2+}] = \alpha_0 \cdot C_{\text{Cd}} = 2,65 \cdot 10^{-7} \cdot 0,01 = 2,65 \cdot 10^{-9} \text{ (моль/дм}^3\text{)};$$

$$[\text{CdI}^+] = \alpha_1 \cdot C_{\text{Cd}} = 7,84 \cdot 10^{-5} \cdot 0,01 = 7,84 \cdot 10^{-7} \text{ (моль/дм}^3\text{)};$$

$$[\text{CdI}_2] = \alpha_2 \cdot C_{\text{Cd}} = 4,96 \cdot 10^{-3} \cdot 0,01 = 4,96 \cdot 10^{-5} \text{ (моль/дм}^3\text{)};$$

$$[\text{CdI}_3^-] = \alpha_3 \cdot C_{\text{Cd}} = 4,64 \cdot 10^{-2} \cdot 0,01 = 4,64 \cdot 10^{-4} \text{ (моль/дм}^3\text{)};$$

$$[\text{CdI}_4^{2-}] = \alpha_4 \cdot C_{\text{Cd}} = 0,95 \cdot 0,01 = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ (моль/дм}^3\text{)}.$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

**1.** Рассчитайте равновесные концентрации ионов  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $[\text{CdNH}_3]^{2+}$  и  $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$  в растворе, содержащем 0,02 моль/дм<sup>3</sup> нитрата кадмия и 1,8 моль/дм<sup>3</sup> аммиака.

2. Установите, какая частица преобладает в растворе, 1 дм<sup>3</sup> которого содержит 0,02 моль нитрата серебра (I) и 0,12 моль бромида натрия.

3. Вычислите равновесные концентрации ионов  $\text{Al}^{3+}$  и его гидроксокомплексов  $[\text{Al}(\text{OH})_2]^+$  и  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$  в растворе, содержащем 0,01 моль/дм<sup>3</sup> нитрата алюминия и 0,05 моль/дм<sup>3</sup> гидроксида натрия.

4. Рассчитайте степени образования (мольные доли) частиц  $\text{Ag}^+$ ,  $[\text{Ag}(\text{SCN})_2]^-$  и  $[\text{Ag}(\text{SCN})_3]^{2-}$  в растворе нитрата серебра (I), содержащем 0,02 моль/дм<sup>3</sup> тиоцианата (роданида) аммония.

5. Рассчитайте равновесные концентрации ионов  $\text{Ag}^+$  и образующихся комплексных частиц в растворе, содержащем 0,2 моль/дм<sup>3</sup> нитрата серебра (I) и 2 моль/дм<sup>3</sup> йодида калия.

6. Установите, какая частица преобладает в 0,02 моль/дм<sup>3</sup> растворе хлорида висмута (III), равновесная концентрация гидроксид-ионов в котором составляет 0,02 моль/дм<sup>3</sup>.

7. Рассчитайте степени образования (мольные доли) комплексных частиц  $[\text{CoNH}_3]^{2+}$ ,  $[\text{Co}(\text{NH}_3)_2]^{2+}$  и  $[\text{Co}(\text{NH}_3)_3]^{2+}$  в растворе соли кобальта (II), содержащем 0,2 моль/дм<sup>3</sup> аммиака.

8. Установите, какая частица доминирует в растворе, содержащем 0,01 моль/дм<sup>3</sup>  $\text{Ag}^+$  и 0,1 моль/дм<sup>3</sup> хлороводородной кислоты.

9. В растворе содержится 0,01 моль/дм<sup>3</sup> нитрата свинца (II) и 1 моль/дм<sup>3</sup> уксусной кислоты. Установите частицу, доминирующую в этом растворе.

10. Вычислите равновесные концентрации частиц в растворе, содержащем 0,01 моль/дм<sup>3</sup> нитрата меди (II) и 1 моль/дм<sup>3</sup> аммиака.

11. Вычислите равновесные концентрации ионов  $\text{Hg}^{2+}$  и образующихся комплексов в 0,02 моль/дм<sup>3</sup> растворе нитрата ртути (II), если исходная концентрация бромида калия равна 0,2 моль/дм<sup>3</sup>.

12. Вычислите равновесные концентрации ионов  $\text{Cd}^{2+}$  и его гидроксокомплексов в растворе, содержащем 0,01 моль/дм<sup>3</sup> нитрата кадмия и 1 моль/дм<sup>3</sup> гидроксида натрия.

13. Рассчитайте равновесные концентрации ионов  $\text{Cd}^{2+}$  и образующихся комплексных частиц в 0,01 моль/дм<sup>3</sup> растворе хлорида кадмия в присутствии 0,1 моль/дм<sup>3</sup> тиоцианата (роданида) аммония.

**14.** Рассчитайте мольные доли ионов  $\text{Hg}^{2+}$  и комплексных частиц в растворе, содержащем  $0,01 \text{ моль/дм}^3$  нитрата ртути (II) и  $0,1 \text{ моль/дм}^3$  йодида калия.

**15.** Вычислите равновесные концентрации ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и его гидроксокомплексов в  $0,1 \text{ моль/дм}^3$  растворе хлорида меди (II), в котором равновесная концентрация гидроксид-ионов равна  $0,01 \text{ моль/дм}^3$ .

**16.** Установите, какая частица преобладает в растворе, содержащем  $1 \cdot 10^{-2} \text{ моль/дм}^3$  ртути (II) и  $0,1 \text{ моль/дм}^3$  аммиака.

**17.** Рассчитайте равновесные концентрации всех комплексных частиц в  $0,1 \text{ моль/дм}^3$  растворе нитрата ртути (II), в котором равновесная концентрация хлорид-ионов равна  $0,2 \text{ моль/дм}^3$ .

**18.** Рассчитайте степени образования всех частиц в  $0,2 \text{ моль/дм}^3$  растворе хлорида железа (II), в котором равновесная концентрация гидроксид-ионов равна  $0,001 \text{ моль/дм}^3$ .

**19.** Рассчитайте равновесные концентрации ионов  $\text{Ni}^{2+}$  и его аммиачных комплексов в  $0,1 \text{ моль/дм}^3$  растворе хлорида никеля (II), содержащем  $2 \text{ моль/дм}^3$  аммиака.

**20.** Рассчитайте степени образования (мольные доли) комплексных частиц  $\text{FeF}^{2+}$ ,  $\text{FeF}_2^+$  и  $\text{FeF}_4^-$ , если известно, что равновесная концентрация фторид-иона в растворе равна  $0,01 \text{ моль/дм}^3$ .

**21.** Установите, какая комплексная частица доминирует в растворе, содержащем  $0,1 \text{ моль/дм}^3$  серебра (I) и  $1 \text{ моль/дм}^3$  тиосульфата натрия  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .

**22.** Рассчитайте равновесные концентрации частиц  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $[\text{Fe}(\text{SCN})]^{2+}$ ,  $[\text{Fe}(\text{SCN})_2]^+$  и  $[\text{Fe}(\text{SCN})_3]$  в  $0,1 \text{ моль/дм}^3$  растворе хлорида железа (III) в присутствии  $2 \text{ моль/дм}^3$  тиоцианата (роданида) аммония.

**23.** Вычислите мольные доли всех частиц, присутствующих в  $0,2 \text{ моль/дм}^3$  растворе нитрата свинца (II), если исходная концентрация хлороводородной кислоты равна  $2 \text{ моль/дм}^3$ .

**24.** Установите, какая частица преобладает в растворе, содержащем  $0,001 \text{ моль/дм}^3$  нитрата марганца (II) и  $0,005 \text{ моль/дм}^3$  гидроксида калия.

**25.** Вычислите мольные доли всех комплексных частиц, присутствующих в растворе, содержащем  $0,02 \text{ моль/дм}^3$  сульфата цинка и  $0,2 \text{ моль/дм}^3$  аммиака.

26. Вычислите, какая частица преобладает в растворе, содержащем 0,02 моль/дм<sup>3</sup> нитрата свинца (II) и 0,1 моль/дм<sup>3</sup> йодида калия.

27. Вычислите равновесные концентрации ионов  $Zn^{2+}$  и его гидроксокомплексов в растворе, содержащем 0,01 моль/дм<sup>3</sup> сульфата цинка и 2 моль/дм<sup>3</sup> гидроксида калия.

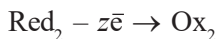
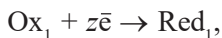
28. Рассчитайте мольные доли иона  $Cd^{2+}$  и его комплексных частиц с цианид-ионами в растворе, содержащем 0,1 моль/дм<sup>3</sup> нитрата кадмия и 0,5 моль/дм<sup>3</sup> цианида калия.

29. Рассчитайте равновесные концентрации частиц  $Pd^{2+}$ ,  $[PdCl]^+$ ,  $[PdCl_2]$  в растворе, содержащем 0,1 моль/дм<sup>3</sup> хлорида палладия (II) и 2 моль/дм<sup>3</sup> хлороводородной кислоты.

30. Рассчитайте мольные доли комплексных частиц  $[NiOH]^+$  и  $[Ni(OH)_3]^-$ , если равновесная концентрация гидроксид-ионов в растворе равна 0,01 моль/дм<sup>3</sup>.

## Равновесие окислительно-восстановительных реакций

Характерной особенностью реакций окисления — восстановления является переход электронов между реагирующими частицами. Процессы с присоединением и отдачей электронов



рассматривают как полуреакции восстановления и окисления соответственно. Частицу, принимающую электрон, называют окислителем, а отдающую — восстановителем. Окисленная и восстановленная формы вещества составляют сопряженную окислительно-восстановительную пару.

Полуреакции окисления и восстановления неосуществимы одна без другой: если есть донор электронов, должен быть их акцептор. Реально протекает суммарная окислительно-восстановительная реакция:





Для характеристики окислительной и восстановительной способности веществ и ионов используют термодинамическую величину — стандартный электродный потенциал  $E_{\text{Оx/Red}}^0$ . Чем больше значение  $E_{\text{Оx/Red}}^0$ , тем более сильным окислителем является окисленная форма Ох и более слабым восстановителем — восстановленная форма Red. Значения стандартных электродных потенциалов для многих окислительно-восстановительных систем приведены в литературе [Лурье, с. 276].

Окислительно-восстановительные потенциалы пар зависят не только от природы восстановителя и окислителя, но и от их активностей и температуры. Эта зависимость выражается уравнением Нернста:

$$E_{\text{Оx/Red}} = E_{\text{Оx/Red}}^0 - \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \ln \frac{a_{\text{Red}}}{a_{\text{Оx}}}, \quad (1.6)$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/(моль · К);  $T$  — абсолютная температура, К;  $z$  — число электронов, участвующих в полуреакции;  $F$  — постоянная Фарадея, 96485 Кл;  $E_{\text{Оx/Red}}^0$  — стандартный электродный потенциал, В;  $a_{\text{Оx}}$  и  $a_{\text{Red}}$  — активности соответственно окисленной и восстановленной форм вещества.

Согласно следствию из закона действия масс  $a_{\text{Оx}}$  и  $a_{\text{Red}}$  должны быть возведены в степень, равную стехиометрическому коэффициенту этих веществ в уравнении полуреакции.

При вычислении окислительно-восстановительных потенциалов вместо активностей ионов часто используют их концентрации, что является некоторым упрощением. В большинстве случаев это допустимо. Если в формулу (1.6) подставить числовые значения констант и от натурального логарифма перейти к десятичному, используя коэффициент перехода 2,3026, то при 298 К (25° С) уравнение Нернста примет вид

$$E_{\text{Оx/Red}} = E_{\text{Оx/Red}}^0 - \frac{0,059}{z} \lg \frac{[\text{Red}]}{[\text{Оx}]}. \quad (1.7)$$

В таком виде уравнение Нернста удобно использовать для решения различных практических задач.

Константа равновесия ( $K$ ) окислительно-восстановительной реакции связана со стандартными электродными потенциалами окислителя и восстановителя формулой

$$\lg K = \frac{(E_{\text{ок-ля}}^0 - E_{\text{в-ля}}^0) \cdot n}{0,059}, \quad (1.8)$$

где  $E_{\text{ок-ля}}^0$  и  $E_{\text{в-ля}}^0$  — стандартные электродные потенциалы пар, вступающих в данной реакции в качестве окислителя и восстановителя соответственно, В;  $n$  — число электронов, участвующих в реакции.

Из формулы (1.8) можно выразить константу равновесия:

$$K = 10^{\frac{(E_{\text{ок-ля}}^0 - E_{\text{в-ля}}^0) \cdot n}{0,059}}. \quad (1.9)$$

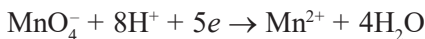
Величина этой константы определяет направление и степень протекания окислительно-восстановительной реакции в заданных условиях. Если  $\lg K > 0$  ( $E_{\text{ок-ля}}^0 > E_{\text{в-ля}}^0$ ), то  $K > 1$ , следовательно, реакция протекает в данном направлении (слева направо). Большое значение константы равновесия свидетельствует о том, что соответствующая реакция протекает практически до конца. Напротив, если  $\lg K < 0$  ( $E_{\text{ок-ля}}^0 < E_{\text{в-ля}}^0$ ), константа равновесия будет очень мала:  $K \ll 1$ , это значит, что равновесие реакции смещено влево, следовательно, реакция должна протекать в противоположном направлении (справа налево). Если разность стандартных потенциалов незначительна, то константа равновесия приближается к единице и соответствующая реакция не может дойти до конца, если не создать условий, которые будут способствовать смещению равновесия в нужном направлении.

## РЕШЕНИЕ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

**Пример 1.** Запишите уравнение Нернста для окислительно-восстановительного потенциала пар: а)  $\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{2+}$ ; б)  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ; в)  $\text{MnO}_4^-/\text{MnO}_4^{2-}$ ; г)  $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}$ .

### Р е ш е н и е

а) Запишем уравнение полуреакции восстановления иона  $\text{MnO}_4^-$  до иона  $\text{Mn}^{2+}$ :



Тогда уравнение Нернста имеет вид

$$E_{\text{MnO}_4^-, \text{H}^+/\text{Mn}^{2+}} = E_{\text{MnO}_4^-, \text{H}^+/\text{Mn}^{2+}}^0 - \frac{0,059}{5} \lg \frac{[\text{Mn}^{2+}]}{[\text{MnO}_4^-] \cdot [\text{H}^+]^8}.$$

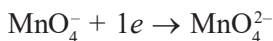
б) Восстановление иона  $\text{Fe}^{3+}$  до иона  $\text{Fe}^{2+}$  протекает по уравнению полуреакции



Уравнение Нернста будет иметь вид

$$E_{\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}} = E_{\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}}^0 - 0,059 \cdot \lg \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{Fe}^{3+}]}.$$

в) Уравнение полуреакции восстановления иона  $\text{MnO}_4^-$  в щелочной среде выглядит следующим образом:



Тогда уравнение Нернста имеет вид

$$E_{\text{MnO}_4^-/\text{MnO}_4^{2-}} = E_{\text{MnO}_4^-/\text{MnO}_4^{2-}}^0 - 0,059 \cdot \lg \frac{[\text{MnO}_4^{2-}]}{[\text{MnO}_4^-]}.$$

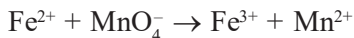
г) Уравнение Нернста для полуреакции восстановления иона  $\text{Cu}^{2+}$  до  $\text{Cu}$



имеет вид

$$E_{\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}} = E_{\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}}^0 - \frac{0,059}{2} \cdot \lg \frac{1}{[\text{Cu}^{2+}]}.$$

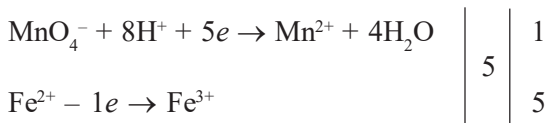
**Пример 2.** Используя метод электронно-ионного баланса (метод полуреакций) составьте в ионной форме уравнение окислительно-восстановительной реакции



Рассчитайте константу равновесия и определите возможность протекания реакции в прямом направлении.

**Решение.** Перманганат-ион  $\text{MnO}_4^-$  является окислителем, в кислой среде он переходит в ион  $\text{Mn}^{2+}$ , принимая 5 электронов. Ион  $\text{Fe}^{2+}$  является восстановителем: он отдает 1 электрон и переходит в ион  $\text{Fe}^{3+}$ .

Коэффициенты при восстановителе и окислителе определяют по электронно-ионным уравнениям полуреакций:



В итоге получаем уравнение в ионной форме:



Константу равновесия рассчитываем по формуле (1.9):

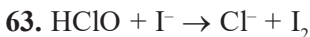
$$K = 10^{\frac{(E_{\text{MnO}_4^-, \text{H}^+/\text{Mn}^{2+}}^0 - E_{\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}}^0) \cdot n}{0,059}} = 10^{\frac{(1,51 - 0,771) \cdot 5}{0,059}} = 10^{62,63} = 4,24 \cdot 10^{62}.$$

Большое значение константы показывает, что равновесие реакции полностью сминуто слева направо, т. е. реакция протекает практически до конца.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

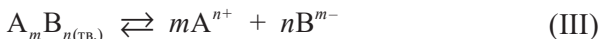
**31—65.** Составьте в ионной форме уравнение окислительно-восстановительной реакции, используя метод электронно-ионного баланса (метод полуреакций). Рассчитайте константу равновесия и установите возможность протекания реакции в прямом направлении.

31.  $\text{SO}_4^{2-} + \text{MnO}_2 \rightarrow \text{Mn}^{2+} + \text{S}_2\text{O}_8^{2-}$
32.  $\text{Cl}^- + \text{PbO}_2 \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{Pb}^{2+}$
33.  $\text{NH}_2\text{OH} + \text{Br}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{Br}^-$
34.  $\text{BrO}_3^- + \text{AsO}_2^- + \text{OH}^- \rightarrow \text{Br}^- + \text{AsO}_4^{3-}$
35.  $\text{HPO}_3^{2-} + \text{SO}_4^{2-} + \text{OH}^- \rightarrow \text{SO}_3^{2-} + \text{PO}_4^{3-}$
36.  $\text{HNO}_2 + \text{ClO}_3^- \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{Cl}^-$
37.  $\text{SO}_3^{2-} + \text{SeO}_3^{2-} \rightarrow \text{Se} + \text{SO}_4^{2-}$
38.  $\text{H}_2\text{SO}_3 + \text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ag} + \text{SO}_4^{2-}$
39.  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + \text{ClO}^- + \text{OH}^- \rightarrow \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$
40.  $\text{Fe}^{2+} + \text{HClO} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Cl}^-$
41.  $\text{Zn} + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{NH}_2\text{OH}$
42.  $\text{Fe}^{2+} + \text{PbO}_2 \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Pb}^{2+}$
43.  $\text{CO} + \text{IO}_3^- \rightarrow \text{I}_2 + \text{CO}_2$
44.  $\text{Cu}^{2+} + \text{NH}_2\text{OH} + \text{H}^+ \rightarrow \text{N}_2 + \text{Cu}^+$
45.  $\text{S} + \text{NO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{NO}_2 + \text{SO}_4^{2-}$
46.  $\text{H}_2\text{SO}_3 + \text{I}_2 \rightarrow \text{I}^- + \text{SO}_4^{2-}$
47.  $\text{NH}_4^+ + \text{BrO}_3^- \rightarrow \text{N}_2 + \text{Br}^-$
48.  $\text{NH}_4^+ + \text{HNO}_2 \rightarrow \text{N}_2$
49.  $\text{Fe}^{2+} + \text{ClO}_3^- \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Cl}^-$
50.  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Ce}^{4+} \rightarrow \text{O}_2 + \text{Ce}^{3+}$
51.  $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{NO}$
52.  $\text{Cr}(\text{OH})_3 + \text{Br}_2 \rightarrow \text{CrO}_4^{2-} + \text{Br}^-$
53.  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 + \text{MnO}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{Mn}^{2+}$
54.  $\text{Au} + \text{ClO}_4^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{Au}^{3+} + \text{Cl}^-$
55.  $\text{MnO}_2 + \text{ClO}_3^- \rightarrow \text{MnO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$
56.  $\text{Hg} + \text{NO}_3^- \rightarrow \text{Hg}_2^{2+} + \text{NO}$
57.  $\text{Cl}^- + \text{SeO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{SeO}_3$
58.  $\text{Cr}^{3+} + \text{S}_2\text{O}_8^{2-} \rightarrow \text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + \text{SO}_4^{2-}$
59.  $\text{Br}_2 + \text{HNO}_2 \rightarrow \text{Br}^- + \text{NO}_3^-$



## Гетерогенное равновесие в системе осадок — раствор

В насыщенном водном растворе малорастворимого соединения  $\text{A}_m\text{B}_n$  равновесное состояние можно представить в виде



Термодинамическая константа равновесия этого процесса называется термодинамическим произведением растворимости  $\text{PP}_a$  (или произведением активностей) и равна

$$K_S^0 = a_{\text{A}}^m \cdot a_{\text{B}}^n = \text{PP}_a. \quad (1.10)$$

По рекомендации IUPAC произведение растворимости обозначается как  $K_S^0$ . Как и другие термодинамические константы,  $\text{PP}_a$  можно использовать для расчетов растворимости только при ионной силе, равной нулю.

Из уравнения (1.10) следует правило произведения растворимости: произведение активностей ионов в степенях, равных стехиометрическим коэффициентам, в насыщенном растворе малорастворимого соединения есть величина постоянная для данного растворителя при заданной температуре и давлении.

Учитывая связь активности ионов с их концентрациями (1.2), уравнение (1.10) можно представить в следующем виде:

$$\text{PP}_a = a_{\text{A}}^m \cdot a_{\text{B}}^n = [\text{A}^{n+}]^m \cdot [\text{B}^{m-}]^n \cdot f_{\text{A}^{n+}}^m \cdot f_{\text{B}^{m-}}^n = \text{PP} \cdot f_{\text{A}^{n+}}^m \cdot f_{\text{B}^{m-}}^n.$$

Величину

$$\text{ПР} = [\text{A}^{n+}]^m \cdot [\text{B}^{m-}]^n \quad (1.11)$$

называют концентрационным произведением растворимости.

Произведение растворимости малорастворимого соединения  $\text{A}_m\text{B}_n$  связано с его молярной растворимостью простым соотношением. В насыщенном растворе (III) растворимость соединения  $\text{A}_m\text{B}_n$  составляет  $S$  моль/дм<sup>3</sup> и концентрации ионов в этом растворе будут равны  $[\text{A}^{n+}] = m \cdot S$  и  $[\text{B}^{m-}] = n \cdot S$ . Подставляя эти значения в выражение концентрационного произведения растворимости (1.11), получаем

$$\text{ПР} = [\text{A}^{n+}]^m \cdot [\text{B}^{m-}]^n = m^m \cdot n^n \cdot S^{m+n}. \quad (1.12)$$

Откуда молярная растворимость равна

$$S = \sqrt[m+n]{\frac{\text{ПР}}{m^m \cdot n^n}}. \quad (1.13)$$

Формула (1.13) справедлива для расчета молярной растворимости любых реальных систем.

На растворимость соединений влияют величина ионной силы раствора, кислотность среды, а также присутствующие в среде формирования осадка комплексообразующие реагенты и посторонние сильные электролиты, имеющие одноименный ион с малорастворимым соединением.

Увеличение ионной силы раствора приводит к уменьшению коэффициентов активности ионов осадка, увеличению реального произведения растворимости и, как следствие, к увеличению растворимости осадка. Влияние ионной силы раствора называют солевым эффектом.

Изменение ионной силы раствора вызывает присутствие в среде формирования осадка посторонних сильных электролитов. Растворимость осадков в присутствии сильных посторонних электролитов вычисляют по уравнению, связывающему произведение растворимости и произведение активностей:

$$\text{ПР}_a = m^m \cdot n^n \cdot f_{\text{A}^{n+}}^m \cdot f_{\text{B}^{m-}}^n \cdot S^{m+n}. \quad (1.14)$$

Отсюда

$$S = \sqrt[m+n]{\frac{\text{ПР}_a}{m^m \cdot n^n \cdot f_{A^{n+}}^m \cdot f_{B^{m-}}^n}}. \quad (1.15)$$

Коэффициенты активности ионов находят из уравнений, связывающих их с ионной силой раствора (1.3).

Оценивая растворимость в присутствии одноименного иона, влиянием ионной силы, как правило, пренебрегают.

Пусть в среде формирования осадка  $A_m B_n$  присутствует посторонний сильный электролит, имеющий одноименный с осадком ион  $A^{n+}$  с концентрацией  $C_{A^{n+}}$  моль/дм<sup>3</sup>. Равновесные концентрации ионов в этом растворе будут равны:  $[B^{m-}] = n \cdot S$  и  $[A^{n+}] = m \cdot S + C_{A^{n+}}$ . Поскольку концентрация ионов  $A^{n+}$ , поступающих из осадка, ничтожно мала по сравнению с концентрацией  $C_{A^{n+}}$ , то  $[A^{n+}] = C_{A^{n+}}$ . Подставляя эти величины в выражение концентрационного произведения растворимости (1.11), получаем

$$\text{ПР} = [A^{n+}]^m \cdot [B^{m-}]^n = C_{A^{n+}}^m \cdot n^n \cdot S^n.$$

Отсюда

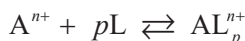
$$S = \sqrt[n]{\frac{\text{ПР}}{C_{A^{n+}}^m \cdot n^n}}. \quad (1.16)$$

Таким образом, увеличение концентрации одноименного иона приводит к уменьшению растворимости. Это явление называют эффектом одноименного иона, на практике им пользуются в гравиметрическом анализе для количественного осаждения малорастворимых соединений. Однако при очень большом избытке одноименного иона может наблюдаться повышение растворимости осадка, во-первых, вследствие солевого эффекта, во-вторых, из-за химических взаимодействий с образованием растворимых комплексных соединений.

Ионы осадка могут вступать в реакции с компонентами раствора — ионами водорода и гидроксид-ионами, собственными



ионами, посторонними веществами. Общая растворимость осадка в этих случаях складывается из концентраций всех форм, которые образуют его катион и анион. Так, анион осадка  $A_m B_n$  может протонироваться, а катион — образовывать комплексы с лигандом  $L^-$ :



В результате этих взаимодействий концентрации катиона  $A^{n+}$  и аниона  $B^{m-}$  в растворе уменьшаются.

Характеристикой полноты протекания конкурирующих реакций является величина, называемая мольной долей  $\alpha_i$  (1.4).

Концентрации ионов в этом растворе будут равны:  $[A^{n+}] = m \cdot \alpha_{A^{n+}} \cdot S$  и  $[B^{m-}] = n \cdot \alpha_{B^{m-}} \cdot S$ . Подставляя эти значения в выражение концентрационного произведения растворимости, получаем

$$ПР = [A^{n+}]^m \cdot [B^{m-}]^n = m^m \cdot n^n \cdot \alpha_{A^{n+}}^m \cdot \alpha_{B^{m-}}^n \cdot S^{m+n}.$$

Отсюда

$$S = \sqrt[m+n]{\frac{ПР}{m^m \cdot n^n \cdot \alpha_{A^{n+}}^m \cdot \alpha_{B^{m-}}^n}}, \quad (1.17)$$

где

$$\alpha_{A^{n+}} = \frac{1}{1 + \beta_1 \cdot [L] + \beta_2 \cdot [L]^2 + \dots + \beta_p \cdot [L]^p}, \quad (1.18)$$

$$\alpha_{B^{m-}} = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_m}{[H^+]^m + [H^+]^{m-1} \cdot k_1 + [H^+]^{m-2} \cdot k_1 \cdot k_2 + \dots + k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_m}. \quad (1.19)$$

Наличие конкурирующих реакций всегда ведет к повышению растворимости вплоть до полного растворения осадка. Регулированием значения рН и концентрации лиганда удастся подобрать условия растворения, осаждения, разделения и предотвращения осаждения веществ.

Из постоянства произведения концентраций ионов в насыщенном растворе в заданных условиях вытекают два следствия, позволяющие рассчитать условия осаждения (растворения) осадка.

Увеличение в растворе концентрации одного из ионов осадка приводит к уменьшению концентрации в растворе других ионов.

Осадок растворяется, если выполняется условие

$$\text{ИП} < \text{ПР},$$

где ИП — ионное произведение, т. е. произведение концентраций ионов, образующих малорастворимое соединение, возведенных к степени их стехиометрических коэффициентов.

И наоборот, осадок выпадает, если

$$\text{ИП} > \text{ПР}.$$

Для любого насыщенного раствора труднорастворимого соединения  $\text{ИП} = \text{ПР}$ .

Это позволяет решать практически важные задачи: находить условия образования и количественного осаждения малорастворимого соединения или условия, при которых осадок не выпадает.

## РЕШЕНИЕ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

**П р и м е р 1.** В  $300 \text{ см}^3$  насыщенного раствора содержится  $8,05 \cdot 10^{-6} \text{ г}$  гидроксида меди (II). Рассчитайте произведение растворимости гидроксида.

**Р е ш е н и е.** Рассчитаем молярную концентрацию насыщенного раствора гидроксида меди (II) по формуле

$$\begin{aligned} S_{\text{Cu(OH)}_2} = C_{\text{Cu(OH)}_2} &= \frac{V_{\text{Cu(OH)}_2}}{V} = \frac{m_{\text{Cu(OH)}_2}}{M_{\text{Cu(OH)}_2} \cdot V} = \\ &= \frac{8,05 \cdot 10^{-6}}{97,561 \cdot 0,3} = 2,75 \cdot 10^{-7} (\text{моль/дм}^3). \end{aligned}$$

Произведение растворимости связано с молярной концентрацией насыщенного раствора (растворимостью) соотношением (1.12).

Для малорастворимого соединения  $\text{Cu}(\text{OH})_2$   $m = 1$ ,  $n = 2$ . Подставляя численные значения в формулу для расчета ПР, получаем

$$\text{ПР}(\text{Cu}(\text{OH})_2) = 1^1 \cdot 2^2 \cdot (2,75 \cdot 10^{-7})^{1+2} = 8,32 \cdot 10^{-20}.$$

О т в е т:  $\text{ПР}(\text{Cu}(\text{OH})_2) = 8,32 \cdot 10^{-20}.$

**П р и м е р 2.** Рассчитайте и сравните растворимости хлорида и хромата серебра в воде.

**Р е ш е н и е.** Поскольку в растворе не протекают конкурирующие реакции и можно принять ионную силу, создаваемую ионами осадка, равной нулю, то расчет растворимости можно проводить по формуле (1.13).

Тогда

$$S_{\text{Ag}_2\text{CrO}_4} = \sqrt[3]{\frac{\text{ПР}_{\text{Ag}_2\text{CrO}_4}}{2^2 \cdot 1^1}} = \sqrt[3]{\frac{1,1 \cdot 10^{-12}}{4}} = 6,50 \cdot 10^{-5} \text{ (моль/дм}^3\text{)},$$

$$S_{\text{AgCl}} = \sqrt{\frac{\text{ПР}_{\text{AgCl}}}{1^1 \cdot 1^1}} = \sqrt{1,78 \cdot 10^{-10}} = 1,33 \cdot 10^{-5} \text{ (моль/дм}^3\text{)}.$$

Поскольку  $S_{\text{Ag}_2\text{CrO}_4} > S_{\text{AgCl}}$ , следовательно, растворимость хромата серебра больше, чем хлорида серебра в 5 раз.

Ответ:  $S(\text{Ag}_2\text{CrO}_4) = 6,50 \cdot 10^{-5} \text{ моль/дм}^3$ ;  $S(\text{AgCl}) = 1,33 \cdot 10^{-5} \text{ моль/дм}^3$ .

**П р и м е р 3.** Рассчитайте растворимость оксалата кальция в 0,01 моль/дм<sup>3</sup> растворе нитрата калия.

**Р е ш е н и е.** Присутствие в среде образования малорастворимого соединения постороннего сильного электролита изменяет ионную силу раствора, которая равна

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i \cdot z_i^2 = \frac{1}{2} (C_{\text{K}^+} \cdot z_{\text{K}^+}^2 + C_{\text{NO}_3^-} \cdot z_{\text{NO}_3^-}^2) = \\ &= \frac{1}{2} (0,01 \cdot 1^2 + 0,01 \cdot (-1)^2) = 0,01 \text{ (моль/дм}^3\text{)}. \end{aligned}$$

По справочным таблицам [Лурье, с. 83] находим при  $\mu = 0,01$  моль/дм<sup>3</sup>  $f_{\text{Ca}^{2+}} = 0,675$ ,  $f_{\text{C}_2\text{O}_4^{2-}} = 0,662$ . Тогда

$$S_{\text{CaC}_2\text{O}_4} = \sqrt{\frac{\text{PP}_{\text{CaC}_2\text{O}_4}}{f_{\text{Ca}^{2+}} \cdot f_{\text{C}_2\text{O}_4^{2-}}}} = \sqrt{\frac{2,3 \cdot 10^{-9}}{0,675 \cdot 0,662}} = 7,17 \cdot 10^{-5} (\text{моль/дм}^3).$$

О т в е т:  $S(\text{CaC}_2\text{O}_4) = 7,17 \cdot 10^{-5}$  моль/дм<sup>3</sup>.

**П р и м е р 4.** Сравните растворимость йодата бария в воде и в 0,10 моль/дм<sup>3</sup> растворе йодата натрия.

**Р е ш е н и е.** Растворимость йодата бария в его насыщенном водном растворе равна

$$S_{\text{Ba}(\text{IO}_3)_2} = \sqrt[3]{\frac{\text{PP}_{\text{Ba}(\text{IO}_3)_2}}{2^2 \cdot 1^1}} = \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot 10^{-9}}{4}} = 7,21 \cdot 10^{-4} (\text{моль/дм}^3).$$

Растворимость  $\text{Ba}(\text{IO}_3)_2$  в его насыщенном водном растворе в присутствии 0,10 моль/дм<sup>3</sup> раствора  $\text{NaIO}_3$  определяется концентрацией ионов  $\text{Ba}^{2+}$ :

$$S = [\text{Ba}^{2+}] = \frac{\text{PP}_{\text{Ba}(\text{IO}_3)_2}}{[\text{IO}_3^-]^2}.$$

Принимаем  $[\text{IO}_3^-] = (2 \cdot S + C_{\text{NaIO}_3})$  моль/дм<sup>3</sup>. Поскольку концентрация йодат-ионов ( $2 \cdot S$ ), поступающих из осадка, ничтожно мала по сравнению с концентрацией  $\text{NaIO}_3$ , то  $[\text{IO}_3^-] = C_{\text{NaIO}_3} = 0,10$  моль/дм<sup>3</sup>. Тогда растворимость йодата бария в 0,10 моль/дм<sup>3</sup> растворе йодата натрия равна

$$S_{\text{Ba}(\text{IO}_3)_2} = \frac{\text{PP}_{\text{Ba}(\text{IO}_3)_2}}{C_{\text{NaIO}_3}^2} = \frac{1,5 \cdot 10^{-9}}{(0,10)^2} = 1,5 \cdot 10^{-7} (\text{моль/дм}^3).$$

Сравнивая это значение с растворимостью йодата бария в воде, видим, что растворимость уменьшилась на три порядка.

О т в е т: растворимость йодата бария в воде выше, чем в 0,10 моль/дм<sup>3</sup> растворе йодата натрия.

П р и м е р 5. Рассчитайте растворимость оксалата кальция при значении pH 3,0.

Р е ш е н и е. В растворе оксалата кальция наряду с реакцией



в кислой среде могут протекать конкурирующие реакции:



Находим мольную долю оксалат-ионов при значении pH 3,0 по формуле (1.19):

$$\alpha_{\text{C}_2\text{O}_4^{2-}} = \frac{k_{a_1} \cdot k_{a_2}}{[\text{H}^+]^2 + k_{a_1} \cdot [\text{H}^+] + k_{a_1} \cdot k_{a_2}} =$$

$$= \frac{5,6 \cdot 10^{-2} \cdot 5,4 \cdot 10^{-5}}{(1 \cdot 10^{-3})^2 + 5,6 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-3} + 5,6 \cdot 10^{-2} \cdot 5,4 \cdot 10^{-5}} = 0,05.$$

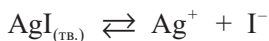
Рассчитываем растворимость по формуле (1.17)

$$S_{\text{CaC}_2\text{O}_4} = \sqrt{\frac{\text{ПР}_{\text{CaC}_2\text{O}_4}}{\alpha_{\text{C}_2\text{O}_4^{2-}}}} = \sqrt{\frac{2,29 \cdot 10^{-9}}{0,05}} = 2,14 \cdot 10^{-4} \text{ (моль/дм}^3\text{)}.$$

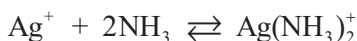
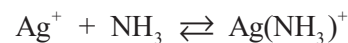
О т в е т:  $S(\text{CaC}_2\text{O}_4) = 2,14 \cdot 10^{-4}$  моль/дм<sup>3</sup>.

П р и м е р 6. Рассчитайте растворимость йодида серебра в 1 моль/дм<sup>3</sup> растворе аммиака.

Р е ш е н и е. В растворе AgI в присутствии NH<sub>3</sub> наряду с реакцией



устанавливаются равновесия



Находим мольную долю ионов серебра в растворе по формуле (1.18). Поскольку  $C_{\text{NH}_3} \gg C_{\text{Ag}}$ , справедливо соотношение  $[\text{NH}_3] = C_{\text{NH}_3} = 1$  моль/дм<sup>3</sup> и

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{Ag}^+} &= \frac{1}{1 + \beta_1 \cdot [\text{NH}_3] + \beta_2 \cdot [\text{NH}_3]^2} = \\ &= \frac{1}{1 + 2,09 \cdot 10^3 \cdot 1 + 1,70 \cdot 10^7 \cdot 1^2} = 5,88 \cdot 10^{-8}. \end{aligned}$$

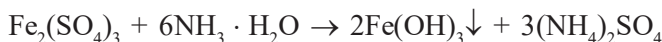
Рассчитываем растворимость по формуле (1.17):

$$S_{\text{AgI}} = \sqrt{\frac{\text{IP}_{\text{AgI}}}{\alpha_{\text{Ag}^+}}} = \sqrt{\frac{8,3 \cdot 10^{-17}}{5,88 \cdot 10^{-8}}} = 3,75 \cdot 10^{-5} \text{ (моль/дм}^3\text{)}.$$

О т в е т:  $S(\text{AgI}) = 3,75 \cdot 10^{-5}$  моль/дм<sup>3</sup>.

**П р и м е р 7.** Установите, образуется ли осадок при добавлении к 20 см<sup>3</sup> 0,005 моль/дм<sup>3</sup> раствора сульфата железа (III) 10 см<sup>3</sup> 0,5 моль/дм<sup>3</sup> раствора аммиака.

**Р е ш е н и е.** Запишем уравнение химической реакции взаимодействия сульфата железа (III) и раствора аммиака:



Осадок образуется, когда величина ИП =  $[\text{Fe}^{3+}] \cdot [\text{OH}^-]^3$  превышает значение  $\text{IP}(\text{Fe}(\text{OH})_3) = 6,3 \cdot 10^{-38}$ .

После смешивания растворов концентрации сульфата железа (III) и аммиака в растворе равны

$$[\text{Fe}^{3+}] = 2C'_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} = \frac{2(C \cdot V)_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3}}{V_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} + V_{\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 20 \cdot 0,005}{20 + 10} = 6,67 \cdot 10^{-3} \text{ (моль/дм}^3\text{)};$$

$$C'_{\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}} = \frac{(C \cdot V)_{\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3} + V_{\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}} = \frac{10 \cdot 0,5}{20 + 10} = 0,1667 \text{ (моль/дм}^3\text{)}.$$

Концентрация гидроксид-ионов меньше исходной концентрации слабого основания, поскольку в водных растворах они диссоциированы не полностью:

$$[\text{OH}^-] = \sqrt{k_{b,\text{NH}_3} \cdot C'_{\text{NH}_3}} = \sqrt{1,75 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1667} =$$

$$= 1,71 \cdot 10^{-3} \text{ (моль/дм}^3\text{)}.$$

Рассчитаем ионное произведение

$$\text{ИП} = [\text{Fe}^{3+}] \cdot [\text{OH}^-]^3 = 6,67 \cdot 10^{-3} \cdot (1,71 \cdot 10^{-3})^3 = 3,34 \cdot 10^{-11}.$$

Поскольку  $\text{ИП} > \text{ПР}$ , осадок  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  выпадает.

О т в е т: осадок гидроксида железа (III) выпадает.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

**66.** Растворимость карбоната кальция в воде составляет  $0,0062 \text{ г/дм}^3$ . Вычислите его произведение растворимости.

**67.** В  $500 \text{ см}^3$  насыщенного раствора содержится  $9,3 \cdot 10^{-4} \text{ г}$  хлорида серебра. Рассчитайте его произведение растворимости.

**68.** Растворимость в воде оксалата кальция составляет  $4,8 \cdot 10^{-5} \text{ моль/дм}^3$ . Рассчитайте его произведение растворимости.

**69.** Растворимость гидроксида магния в воде составляет  $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3$ . Вычислите его произведение растворимости.

**70.** В  $100 \text{ см}^3$  воды растворимость карбоната стронция равна  $6,0 \cdot 10^{-4} \text{ г}$ . Рассчитайте его произведение растворимости.

71. В  $500 \text{ см}^3$  раствора содержится  $0,1078 \text{ г}$  хромата серебра (I). Вычислите его произведение растворимости.

72. В  $2 \text{ дм}^3$  раствора содержится  $0,60 \text{ г}$  иодида серебра (I). Рассчитайте его произведение растворимости.

73. Растворимость хлорида свинца (II) в  $100 \text{ см}^3$  воды составляет  $1,2 \text{ г}$ . Рассчитайте его произведение растворимости.

74. В  $1 \text{ дм}^3$  раствора содержится  $1,37 \cdot 10^{-4} \text{ г}$  бромиды серебра (I). Вычислите его произведение растворимости.

75. Массовая концентрация хромата бария в насыщенном растворе составляет  $2,7 \text{ мг/дм}^3$ . Рассчитайте его произведение растворимости.

76. В  $100 \text{ см}^3$  воды растворимость сульфата бария равна  $2,33 \cdot 10^{-4} \text{ г}$ . Рассчитайте его произведение растворимости.

77. Растворимость сульфата кальция составляет  $0,96 \text{ г/дм}^3$ . Вычислите его произведение растворимости.

78. Растворимость нитрита серебра (I) в воде составляет  $2,22 \text{ г/дм}^3$ . Рассчитайте его произведение растворимости.

79. Растворимость фосфата магния-аммония в воде равна  $8,6 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ . Вычислите его произведение растворимости.

80. Растворимость фосфата алюминия равна  $9,28 \cdot 10^{-8} \text{ г/дм}^3$ . Вычислите его произведение растворимости.

81. В  $1 \text{ дм}^3$  насыщенного раствора фторида бария содержится  $1,14 \text{ г}$  этой соли. Вычислите ее произведение растворимости.

82. В  $100 \text{ см}^3$  воды растворимость гидроксида железа (III) равна  $9,6 \cdot 10^{-5} \text{ г}$ . Рассчитайте его произведение растворимости.

83. Растворимость фосфата висмута (III) в  $200 \text{ см}^3$  воды составляет  $2,19 \cdot 10^{-10} \text{ г}$ . Вычислите его произведение растворимости.

84. Растворимость хромата кальция в воде составляет  $2,66 \cdot 10^{-2} \text{ г/дм}^3$ . Рассчитайте его произведение растворимости.

85. В  $500 \text{ см}^3$  насыщенного раствора фторида кальция содержится  $8,4 \cdot 10^{-3} \text{ г}$  соли. Рассчитайте ее произведение растворимости.

86. Массовая концентрация насыщенного раствора оксалата кобальта (II) равна  $36,9 \text{ мг/дм}^3$ . Рассчитайте произведение растворимости соли.

87. В  $1 \text{ дм}^3$  насыщенного раствора йодида меди (I) содержится  $0,2 \text{ мг}$  соли. Рассчитайте ее произведение растворимости.



**88.** В 100 см<sup>3</sup> воды растворимость сульфида серебра (I) равна  $6,8 \cdot 10^{-16}$  г. Рассчитайте его произведение растворимости.

**89.** В 250 см<sup>3</sup> воды растворимость фосфата лития составляет 0,1257 г. Вычислите его произведение растворимости.

**90.** Растворимость цианида цинка в воде составляет 4,72 мг/дм<sup>3</sup>. Вычислите его произведение растворимости.

**91.** Молярная концентрация насыщенного раствора гидроксида свинца (II) равна  $5,82 \cdot 10^{-6}$  моль/дм<sup>3</sup>. Вычислите произведение растворимости гидроксида.

**92.** В 100 см<sup>3</sup> воды растворимость карбоната серебра (I) равна  $3,2 \cdot 10^{-3}$  г. Рассчитайте его произведение растворимости.

**93.** Молярная концентрация насыщенного раствора фосфата стронция равна  $2,47 \cdot 10^{-7}$  моль/дм<sup>3</sup>. Вычислите произведение растворимости соли.

**94.** В 1 дм<sup>3</sup> воды растворимость оксалата марганца (II) составляет 0,3197 г. Вычислите его произведение растворимости.

**95.** В 100 см<sup>3</sup> воды растворимость сульфата ртути (I) равна 0,2692 г. Рассчитайте его произведение растворимости.

**96.** Вычислите и сравните растворимость оксалата кальция в воде и 0,01 моль/дм<sup>3</sup> растворе оксалата натрия.

**97.** Вычислите и сравните растворимость карбоната бария в воде и в 0,01 моль/дм<sup>3</sup> растворе нитрата натрия.

**98.** Вычислите и сравните растворимость сульфида меди (II) в воде и в 0,10 моль/дм<sup>3</sup> растворе аммиака.

**99.** Вычислите и сравните растворимость сульфата стронция в воде и 0,10 моль/дм<sup>3</sup> растворе сульфата калия.

**100.** Вычислите и сравните растворимость карбоната лития в воде и в 0,01 моль/дм<sup>3</sup> растворе нитрата калия.

**101.** Вычислите и сравните растворимость сульфида никеля (II) в воде и в растворе со значением pH 6,0.

**102.** Вычислите и сравните растворимость хлорида ртути (I) Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> в воде и в 0,10 моль/дм<sup>3</sup> растворе хлорида калия.

**103.** Вычислите и сравните растворимость тиоцианата (роданида) серебра (I) в воде и в 0,01 моль/дм<sup>3</sup> растворе аммиака.

**104.** Вычислите и сравните растворимость фторида магния в воде и в растворе со значением pH 2,0.

**105.** Вычислите и сравните растворимость йодата серебра (I) в воде и в  $0,10 \text{ моль/дм}^3$  растворе нитрата серебра (I).

**106.** Вычислите и сравните растворимость бромида серебра (I) в воде и в  $0,01 \text{ моль/дм}^3$  растворе нитрата натрия.

**107.** Вычислите и сравните растворимость хромата серебра (I) в воде и в растворе со значением pH 4,0.

**108.** Вычислите и сравните растворимость тиоцианата (роданида) серебра (I) в воде и в  $0,10 \text{ моль/дм}^3$  растворе роданида натрия.

**109.** Вычислите и сравните растворимость дихромата серебра (I) в воде и в  $0,10 \text{ моль/дм}^3$  растворе хлорида калия.

**110.** Вычислите и сравните растворимость оксалата стронция в воде и в  $0,01 \text{ моль/дм}^3$  растворе хлороводородной кислоты.

**111.** Вычислите и сравните растворимость фторида кальция в воде и в  $0,10 \text{ моль/дм}^3$  растворе фторида аммония.

**112.** Вычислите и сравните растворимость йодида свинца (II) в воде и в  $0,01 \text{ моль/дм}^3$  раствора тиосульфата натрия.

**113.** Вычислите и сравните растворимость карбоната магния в воде и в  $0,01 \text{ моль/дм}^3$  растворе хлорида натрия.

**114.** Вычислите и сравните растворимость хромата свинца (II) в воде и в  $0,20 \text{ моль/дм}^3$  растворе нитрата свинца (II).

**115.** Вычислите и сравните растворимость сульфата стронция в воде и в  $0,01 \text{ моль/дм}^3$  растворе хлорида калия.

**116.** Вычислите и сравните растворимость хромата свинца (II) в воде и в растворе со значением pH 4,0.

**117.** Вычислите и сравните растворимость хромата бария в воде и в  $1 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3$  растворе хлорида бария.

**118.** Вычислите и сравните растворимость хромата бария в воде и в  $0,10 \text{ моль/дм}^3$  растворе хлорида натрия.

**119.** Вычислите и сравните растворимость карбоната кальция в воде и в  $0,01 \text{ моль/дм}^3$  растворе гидроксида калия.

**120.** Вычислите и сравните растворимость сульфата свинца (II) в воде и в  $1 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3$  растворе сульфата натрия.

**121.** Вычислите и сравните растворимость йодида свинца (II) в воде и в  $5 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3$  растворе нитрата алюминия.

**122.** Вычислите и сравните растворимость карбоната кадмия в воде и  $0,10 \text{ моль/дм}^3$  растворе цианида калия.

**123.** Вычислите и сравните растворимость карбоната меди (II) в воде и в растворе со значением pH 5,0.

**124.** Вычислите и сравните растворимость оксалата кальция в воде и в 0,10 моль/дм<sup>3</sup> растворе хлорида калия.

**125.** Вычислите и сравните растворимость хлорида ртути (I) в воде и в 1 моль/дм<sup>3</sup> растворе хлорида натрия.

**126.** Установите, образуется ли осадок при смешивании равных объемов 0,002 моль/дм<sup>3</sup> растворов хлорида стронция и сульфата калия.

**127.** Установите, образуется ли осадок при смешивании 50 см<sup>3</sup> 0,001 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты и 500 см<sup>3</sup> раствора нитрата серебра (I) такой же концентрации.

**128.** Вычислите массу гидроксида натрия, которую необходимо добавить к 250 см<sup>3</sup>  $5 \cdot 10^{-5}$  моль/дм<sup>3</sup> раствора хлорида магния, чтобы образовался осадок.

**129.** Смешаны равные объемы 0,02 моль/дм<sup>3</sup> раствора нитрата серебра (I) и 1,00 моль/дм<sup>3</sup> раствора серной кислоты. Установите, образуется ли осадок.

**130.** Вычислите объем 2 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты, который следует добавить к 200 см<sup>3</sup>  $3 \cdot 10^{-2}$  моль/дм<sup>3</sup> раствора нитрата свинца (II), чтобы образовался осадок.

**131.** К 20 см<sup>3</sup> 0,20 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлорида марганца (II) прибавили 10 см<sup>3</sup> 2 моль/дм<sup>3</sup> раствора аммиака. Установите, образуется ли осадок.

**132.** Установите, образуется ли осадок при смешивании равных объемов 0,01 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлорида кальция и 0,02 моль/дм<sup>3</sup> раствора серной кислоты.

**133.** Вычислите массу оксалата калия, которую необходимо добавить к 2,5 дм<sup>3</sup>  $1 \cdot 10^{-4}$  моль/дм<sup>3</sup> раствора хлорида меди (II), чтобы образовался осадок.

**134.** Установите, образуется ли осадок при смешивании 50 см<sup>3</sup>  $1 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup> раствора хлорида кальция и 150 см<sup>3</sup> 0,05 моль/дм<sup>3</sup> раствора фосфата натрия.

**135.** Вычислите объем 1,50 моль/дм<sup>3</sup> раствора бромида натрия, который следует добавить к 50 см<sup>3</sup>  $1 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup> раствора ацетата свинца (II), чтобы образовался осадок.

**136.** Установите, образуется ли осадок при смешивании  $30 \text{ см}^3$  0,1 %-го раствора ацетата свинца (II) и  $70 \text{ см}^3$  0,02 моль/дм<sup>3</sup> раствора хромата калия.

**137.** Установите, образуется ли осадок при смешивании  $120 \text{ см}^3$   $1 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup> раствора сульфата меди (II) и  $30 \text{ см}^3$  0,01 моль/дм<sup>3</sup> раствора карбоната калия.

**138.** Вычислите массу сульфита натрия, которую необходимо добавить к  $500 \text{ см}^3$   $1 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup> раствора нитрата кальция, чтобы образовался осадок.

**139.** Установите, образуется ли осадок при смешивании  $40 \text{ см}^3$  0,01 моль/дм<sup>3</sup> раствора нитрата марганца (II) и  $160 \text{ см}^3$  0,015 %-го раствора сульфида натрия.

**140.** Вычислите объем  $2,5 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup> раствора фторида аммония, который следует добавить к  $80 \text{ см}^3$  0,01 моль/дм<sup>3</sup> раствора сульфата кальция, чтобы образовался осадок.

**141.** Установите, образуется ли осадок при смешивании  $20 \text{ см}^3$   $1 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup> раствора нитрата серебра (I) и  $80 \text{ см}^3$  0,002 моль/дм<sup>3</sup> раствора хромата калия.

**142.** Установите, образуется ли осадок при смешивании  $300 \text{ см}^3$  0,05 %-го раствора ацетата свинца (II) и  $100 \text{ см}^3$   $1 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup> раствора йодида калия.

**143.** Вычислите массу оксалата аммония, которую необходимо добавить к  $750 \text{ см}^3$   $1 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup> раствора сульфата железа (II), чтобы образовался осадок.

**144.** Установите, образуется ли осадок при смешивании  $250 \text{ см}^3$  0,015 %-го раствора хлорида бария и  $150 \text{ см}^3$  0,01 моль/дм<sup>3</sup> раствора карбоната натрия.

**145.** Вычислите массу перманганата калия, которую следует добавить к  $75 \text{ см}^3$  0,10 моль/дм<sup>3</sup> раствора ацетата серебра (I), чтобы образовался осадок.

**146.** Установите, образуется ли осадок при смешивании  $100 \text{ см}^3$  0,01 %-го раствора нитрата стронция и  $250 \text{ см}^3$   $1 \cdot 10^{-3}$  моль/дм<sup>3</sup> раствора оксалата аммония.

**147.** Установите, образуется ли осадок при смешивании  $150 \text{ см}^3$  0,01 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлорида железа (II) и  $350 \text{ см}^3$  0,01 %-го раствора гидроксида калия.

**148.** Вычислите массу фторида аммония, которую необходимо добавить к  $270 \text{ см}^3 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3$  раствора йодида стронция, чтобы образовался осадок.

**149.** Установите, образуется ли осадок при смешивании  $200 \text{ см}^3$  0,1 %-го раствора сульфата алюминия и  $100 \text{ см}^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3$  раствора гидроксида натрия.

**150.** Вычислите объем  $0,015 \text{ моль/дм}^3$  раствора селенита натрия, который следует добавить к  $100 \text{ см}^3 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3$  раствора сульфата кобальта (II), чтобы образовался осадок.

**151.** Установите, образуется ли осадок при смешивании  $100 \text{ см}^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3$  раствора нитрата свинца (II) и  $200 \text{ см}^3$  раствора йодида натрия с концентрацией  $0,15 \text{ г/дм}^3$ .

**152.** К  $5 \text{ см}^3 \cdot 0,01 \text{ моль/дм}^3$  раствора фторида калия прибавили  $10 \text{ см}^3 \cdot 0,02 \text{ моль/дм}^3$  раствора нитрата бария, после чего объем раствора довели до  $100 \text{ см}^3$ . Установите, образуется ли осадок.

**153.** Вычислите массу сульфата калия, которую необходимо добавить к  $285 \text{ см}^3 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3$  раствора нитрата стронция, чтобы образовался осадок.

**154.** Установите, образуется ли осадок при растворении  $25 \text{ мг}$  хлорида магния в растворе, полученном при разбавлении  $10 \text{ см}^3 \cdot 0,10 \text{ моль/дм}^3$  раствора гидроксида натрия до  $1 \text{ дм}^3$ .

**155.** Вычислите объем  $0,1 \text{ моль/дм}^3$  раствора селенита натрия, который следует добавить к  $150 \text{ см}^3 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3$  раствора хлорида цинка, чтобы образовался осадок.

## 2. ТИТРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА

### Способы выражения концентрации раствора

Важнейшей характеристикой раствора является его концентрация — величина, измеряемая количеством или массой растворенного вещества в определенном объеме или массе раствора (иногда растворителя).

Существуют различные способы выражения концентрации растворов.

*Массовая доля* растворенного вещества ( $\omega$ ) — это безразмерная физическая величина, равная отношению массы растворенного вещества ( $m$ ) к общей массе раствора ( $m_p$ ), т. е.

$$\omega = \frac{m}{m_p}, \text{ или } \omega = \frac{m}{m_p} \cdot 100 \%. \quad (2.1)$$

Например, массовая доля растворенного вещества — хлороводородной кислоты в воде равна 0,15, или 15 %. Это означает, что в растворе хлороводородной кислоты массой 100 г содержится хлороводородная кислота массой 15 г и вода массой 85 г.

Масса раствора может быть рассчитана по формуле

$$m_p = \rho \cdot V, \quad (2.2)$$

где  $\rho$  — плотность раствора, г/см<sup>3</sup>;  $V$  — объем раствора, см<sup>3</sup>.

*Молярная концентрация* ( $C$ ) — это отношение количества вещества ( $\nu$ , моль) к объему раствора ( $V$ , дм<sup>3</sup>):

$$C = \frac{\nu}{V} = \frac{m}{M \cdot V}, \quad (2.3)$$

где  $m$  — масса растворенного вещества, г;  $M$  — молярная масса растворенного вещества, г/моль.

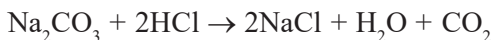
Единицей измерения молярной концентрации является моль/дм<sup>3</sup>. Часто вместо этой единицы измерения после численного значения ставят букву «М».

В титриметрии концентрации титранта и титруемого вещества обычно выражают в молях эквивалентов вещества в одном кубическом дециметре, или, что то же самое, одном литре раствора (*нормальная концентрация*, или *молярная концентрация эквивалента*).

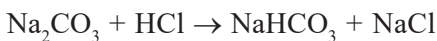
Эквивалентом называют условную частицу вещества, которая может присоединять, высвобождать, замещать один ион водорода в кислотно-основных реакциях, или может быть эквивалентной одному электрону в окислительно-восстановительных реакциях. Фактор эквивалентности ( $f_{\text{экв}}$ ) — это число, показывающее, какая доля реальной частицы вещества эквивалентна одному иону водорода в кислотно-основной реакции или одному электрону в окислительно-восстановительных реакциях.

Значения эквивалента и фактора эквивалентности могут изменяться в зависимости от того, в какой конкретной реакции участвует данное вещество.

Так, для кислотно-основной реакции

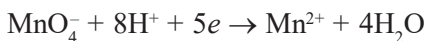


$f_{\text{экв}}(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 1/2$ , а для реакции

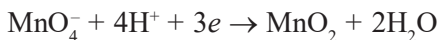


$f_{\text{экв}}(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 1$ .

В полуреакции



$f_{\text{экв}}(\text{KMnO}_4) = 1/5$ , а в полуреакции



$f_{\text{экв}}(\text{KMnO}_4) = 1/3$ .

Молярной массой эквивалента вещества, или эквивалентной массой, называют массу одного моля эквивалента этого вещества,

которая равна произведению молярной массы  $M$  вещества и фактора эквивалентности  $f_{\text{экр}}$ :

$$M_{\text{экр}} = M \cdot f_{\text{экр}}. \quad (2.4)$$

Итак, *нормальная концентрация* ( $N$ ) представляет собой отношение числа моль эквивалентов ( $m/M_{\text{экр}}$ ) растворенного вещества к объему раствора ( $V$ ):

$$N = \frac{v_{\text{экр}}}{V} = \frac{m}{M_{\text{экр}} \cdot V}. \quad (2.5)$$

Нормальную концентрацию выражают в моль-экр/дм<sup>3</sup>. Для записи такой концентрации растворов используют сокращение «н», например, 0,1000 н Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

Молярную концентрацию эквивалента обозначают латинской буквой  $c$  с указанием эквивалента (обычно в скобках). Например,  $c(\text{HCl}) = 0,1$  моль/дм<sup>3</sup> или  $c(1/5 \text{ KMnO}_4) = 0,05$  моль/дм<sup>3</sup>.

Иногда для обозначения концентрации используют *титр по исходному веществу* — это количество граммов (или миллиграммов) вещества, содержащегося в 1 см<sup>3</sup> раствора:

$$T = \frac{m}{V} = \frac{N \cdot M_{\text{экр}}}{1000}.$$

При проведении однотипных титриметрических определений удобно использовать *титр по определяемому веществу*. Титр вещества А по определяемому веществу Х — это масса определяемого вещества Х, которая реагирует с 1 см<sup>3</sup> раствора вещества А:

$$T_{\text{АХ}} = \frac{m_{\text{Х}}}{V_{\text{А}}} = \frac{N_{\text{А}} \cdot M_{\text{экр(Х)}}}{1000}.$$

В табл. 2 приведены формулы, позволяющие осуществить переход между разными способами выражения концентрации раствора.



**Формулы перехода от одних выражений концентраций растворов  
к другим**

Концентрация	$\omega$	$T$	$N$	$C$
$\omega, \%$	$\omega$	$\frac{100 \cdot T}{\rho}$	$\frac{N \cdot M_{\text{экв}}}{10\rho}$	$\frac{C \cdot M}{10\rho}$
$T, \text{г/см}^3$	$\frac{\omega \cdot \rho}{100}$	$T$	$\frac{N \cdot M_{\text{экв}}}{1000}$	$\frac{C \cdot M}{1000}$
$N, \text{н}$	$\frac{10 \cdot \rho \cdot \omega}{M_{\text{экв}}}$	$\frac{1000 \cdot T}{M_{\text{экв}}}$	$N$	$\frac{C}{f_{\text{экв}}}$
$C, \text{моль/дм}^3$	$\frac{10 \cdot \rho \cdot \omega}{M}$	$\frac{1000 \cdot T}{M}$	$N \cdot f_{\text{экв}}$	$C$

Одна из наиболее существенных особенностей титриметрического анализа заключается в том, что при титровании используют не избыток реагента, а количество его, точно отвечающее уравнению реакции и химически эквивалентное количеству определяемого вещества. Для количественных расчетов в титриметрическом анализе используют закон эквивалентов:

$$(N \cdot V)_{\text{X}} = (N \cdot V)_{\text{R}},$$

где  $N$  — нормальная концентрация раствора, н;  $V$  — объем раствора определяемого вещества X и титранта R соответственно.

### РЕШЕНИЕ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

**П р и м е р 1.** Рассчитайте массовую долю хлорида натрия в растворе с молярной концентрацией 3 моль/дм<sup>3</sup>. Плотность раствора равна 1,12 г/см<sup>3</sup>.

**Р е ш е н и е.** Массовая доля вещества в растворе связана с его молярной концентрацией соотношением

$$\omega_{\text{NaCl}} = \frac{C_{\text{NaCl}} \cdot M_{\text{NaCl}}}{10 \cdot \rho} = \frac{3 \cdot 58,443}{10 \cdot 1,12} = 15,65 (\%).$$

О т в е т:  $\omega(\text{NaCl}) = 15,65 \%$ .

П р и м е р 2. Массовая доля муравьиной кислоты в растворе составляет 0,45 %. Рассчитайте молярную концентрацию раствора муравьиной кислоты, его титр и титр этого раствора по гидроксиду кальция.

Р е ш е н и е. Титр и молярную концентрацию раствора можно рассчитать по формулам:

$$C_{\text{НСООН}} = \frac{10 \cdot \rho \cdot \omega_{\text{НСООН}}}{M_{\text{НСООН}}},$$

$$T_{\text{НСООН}} = \frac{\omega_{\text{НСООН}} \cdot \rho}{100}.$$

Поскольку массовая доля растворенного вещества в растворе очень мала, можно принять, что плотность этого раствора равна плотности растворителя, т. е. воды ( $1 \text{ г/см}^3$ ). Тогда

$$C_{\text{НСООН}} = \frac{10 \cdot 1 \cdot 0,45}{46,026} = 0,0978 (\text{моль/дм}^3),$$

$$T_{\text{НСООН}} = \frac{0,45 \cdot 1}{100} = 0,004500 (\text{г/см}^3).$$

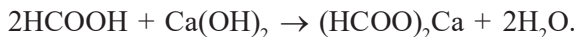
Титр по гидроксиду кальция  $T(\text{НСООН}/\text{Ca}(\text{OH})_2)$  можно рассчитать по формуле

$$T_{\text{НСООН}/\text{Ca}(\text{OH})_2} = \frac{N_{\text{НСООН}} \cdot M_{\text{экв}(\text{Ca}(\text{OH})_2)}}{1000}.$$

Одна молекула НСООН содержит один ион водорода, следовательно,  $f_{\text{экв}}(\text{НСООН}) = 1$  и нормальная концентрация раствора равна

$$N_{\text{HCOOH}} = \frac{C_{\text{HCOOH}}}{f_{\text{экв}}(\text{HCOOH})} = \frac{0,0978}{1} = 0,0978 \text{ (н)}.$$

Взаимодействие муравьиной кислоты с гидроксидом кальция протекает по уравнению реакции



Фактор эквивалентности гидроксида кальция равен  $f_{\text{экв}}(\text{Ca}(\text{OH})_2) = 1/2$ , так как с одной молекулой щелочи вступают во взаимодействие две молекулы кислоты, содержащей один ион водорода. Следовательно,  $M_{\text{экв}}(\text{Ca}(\text{OH})_2) = M(\text{Ca}(\text{OH})_2) \cdot f_{\text{экв}}(\text{Ca}(\text{OH})_2) = 37,046 \text{ г/моль}$ .

Подставляя численные значения в формулу для расчета  $T(\text{HCOOH}/\text{Ca}(\text{OH})_2)$ , получаем

$$T_{\text{HCOOH}/\text{Ca}(\text{OH})_2} = \frac{0,0978 \cdot 37,046}{1000} = 0,003623 \text{ (г/см}^3\text{)}.$$

О т в е т:  $C(\text{HCOOH}) = 0,0978 \text{ моль/дм}^3$ ;  $T(\text{HCOOH}) = 0,004500 \text{ г/см}^3$ ;  $T(\text{HCOOH}/\text{Ca}(\text{OH})_2) = 0,003623 \text{ г/см}^3$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

**156.** Вычислите титр и молярную концентрацию 0,0952 н раствора серной кислоты.

**157.** Вычислите молярную концентрацию раствора гидроксида калия, имеющего титр по хлороводородной кислоте 0,004020 г/см<sup>3</sup>.

**158.** Вычислите молярную концентрацию и титр 5 %-го раствора азотной кислоты плотностью 1,03 г/см<sup>3</sup>.

**159.** Вычислите нормальную концентрацию 12 %-го раствора аммиака плотностью 0,95 г/см<sup>3</sup>.

**160.** Вычислите титр 0,0983 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты по гидроксиду натрия.

**161.** Рассчитайте титр 10 %-го раствора карбоната натрия плотностью 1,10 г/см<sup>3</sup>.

**162.** Рассчитайте молярную концентрацию 6 %-го раствора серной кислоты плотностью  $1,04 \text{ г/см}^3$ .

**163.** Рассчитайте молярную концентрацию раствора гидроксида натрия, имеющего титр по хлороводородной кислоте, равный  $0,003645 \text{ г/см}^3$ .

**164.** Массовая доля уксусной кислоты в столовом уксусе (плотность  $1,0 \text{ г/см}^3$ ) 9,0 %. Вычислите титр раствора кислоты.

**165.** Титр раствора гидроксида бария по хлороводородной кислоте равен  $0,005640 \text{ г/см}^3$ . Вычислите нормальную концентрацию раствора щелочи.

**166.** Титр раствора азотной кислоты равен  $0,006300 \text{ г/см}^3$ . Вычислите титр этого раствора по оксиду кальция.

**167.** Определите массовую долю растворенного вещества в  $0,900 \text{ моль/дм}^3$  растворе фосфорной кислоты плотностью  $1,05 \text{ г/см}^3$ .

**168.** Рассчитайте титр по гидроксиду натрия 10 %-го раствора серной кислоты плотностью  $1,07 \text{ г/см}^3$ .

**169.** Вычислите нормальную концентрацию раствора гидроксида калия, имеющего титр по серной кислоте  $0,005006 \text{ г/см}^3$ .

**170.** Рассчитайте нормальную концентрацию 27 %-го раствора хлороводородной кислоты плотностью  $1,14 \text{ г/см}^3$ .

**171.** Рассчитайте молярную концентрацию 8 %-го раствора сульфата натрия плотностью  $1,08 \text{ г/см}^3$ .

**172.** Рассчитайте массовую долю растворенного вещества, содержащегося в 1,370 н растворе уксусной кислоты плотностью  $1,01 \text{ г/см}^3$ .

**173.** Вычислите массовую долю растворенного вещества в растворе гидроксида натрия плотностью  $1,01 \text{ г/см}^3$ , имеющего титр, равный  $0,009900 \text{ г/см}^3$ .

**174.** Вычислите массовую долю растворенного вещества в растворе серной кислоты с титром  $0,90 \text{ г/см}^3$  (плотность  $1,50 \text{ г/см}^3$ ).

**175.** Массовая доля аммиака в нашатырном спирте плотностью  $0,958 \text{ г/см}^3$  равна 10 %. Вычислите молярную концентрацию этого раствора.

**176.** Рассчитайте нормальную концентрацию и титр по гидроксиду калия 10 %-го раствора азотной кислоты плотностью  $1,06 \text{ г/см}^3$ .

**177.** Титр раствора карбоната натрия по азотной кислоте равен  $0,006500 \text{ г/см}^3$ . Вычислите массовую долю растворенного вещества в этом растворе плотностью  $1,01 \text{ г/см}^3$ .

**178.** Рассчитайте титр и молярную концентрацию  $0,1054 \text{ н}$  раствора серной кислоты.

**179.** Определите массовую долю растворенного вещества в  $1,50 \text{ моль/дм}^3$  растворе гидроксида калия плотностью  $1,07 \text{ г/см}^3$ .

**180.** Определите титр  $10 \text{ \%}$ -го раствора хлороводородной кислоты плотностью  $1,05 \text{ г/см}^3$ .

**181.** Молярная концентрация раствора гидроксида бария равна  $0,0955 \text{ моль/дм}^3$ . Рассчитайте титр этого раствора по азотной кислоте.

**182.** Титр раствора серной кислоты равен  $0,004852 \text{ г/см}^3$ . Вычислите нормальную и молярную концентрации этого раствора.

**183.** Определите массовую долю растворенного вещества в  $2 \text{ моль/дм}^3$  растворе гидроксида натрия плотностью  $1,08 \text{ г/см}^3$ .

**184.** Вычислите массовую долю растворенного вещества, содержащегося в  $16,34 \text{ моль/дм}^3$  растворе азотной кислоты плотностью  $1,43 \text{ г/см}^3$ .

**185.** Титр раствора уксусной кислоты по гидроксиду калия равен  $0,005400 \text{ г/см}^3$ . Рассчитайте нормальную концентрацию раствора уксусной кислоты.

## Приготовление рабочих растворов

Рабочие растворы в титриметрии получают растворением навески реагента или разбавлением концентрированного раствора до определенного объема. Расчет массы навески ( $m_x$ ), необходимой для приготовления раствора нужной концентрации, проводят по формуле

$$m_x = \frac{(N \cdot V)_x \cdot M_{\text{экв}(X)}}{1000}, \quad (2.6)$$

где  $N_x$  — нормальная концентрация раствора, н;  $V_x$  — объем раствора,  $\text{см}^3$ ;  $M_{\text{экв}(X)}$  — молярная масса эквивалента вещества,  $\text{г/моль}$ ;  $1000$  — коэффициент перевода  $\text{дм}^3$  в  $\text{см}^3$ .

Если реагент, используемый для приготовления раствора, содержит индифферентные примеси, то его массу (g, г) рассчитывают по формуле

$$g = \frac{(N \cdot V)_X \cdot M_{\text{экв}(X)}}{10 \cdot \omega_X}, \quad (2.7)$$

где  $\omega_X$  — массовая доля основного компонента в реагенте, %.

Для расчета объема концентрированного раствора, необходимого для приготовления разбавленного раствора, используют формулу закона эквивалентов

$$(N \cdot V)_1 = (N \cdot V)_2.$$

## РЕШЕНИЕ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

**Пример 1.** Рассчитайте массу навески технического гидроксида натрия, содержащую 12,5 % примесей и необходимую для приготовления 250 см<sup>3</sup> раствора с титром 0,002000 г/см<sup>3</sup>.

**Решение.** Массу навески гидроксида натрия, необходимую для приготовления раствора, рассчитываем, используя формулу

$$T_{\text{NaOH}} = \frac{m_{\text{NaOH}}}{V_{\text{NaOH}}}.$$

Итак,

$$m_{\text{NaOH}} = T_{\text{NaOH}} \cdot V_{\text{NaOH}} = 0,002000 \cdot 250 = 0,5000 \text{ (г)}.$$

Массу гидроксида натрия с учетом содержания примесей (g) находим из формулы

$$\omega_{\text{NaOH}} = \frac{m_{\text{NaOH}}}{g} \cdot 100\%,$$

$$g = \frac{m_{\text{NaOH}}}{\omega_{\text{NaOH}}} \cdot 100\% = \frac{m_{\text{NaOH}}}{100 - \omega_{\text{примесей}}} \cdot 100 \%,$$

$$g = \frac{0,5000}{100 - 12,5} \cdot 100 \% = 0,5714 \text{ (г)}.$$

О т в е т:  $g(\text{NaOH}) = 0,5714 \text{ г}$ .

П р и м е р 2. Рассчитайте объем 35 %-го раствора азотной кислоты плотностью  $1,215 \text{ г/см}^3$ , необходимый для приготовления  $2 \text{ дм}^3$   $0,2500 \text{ моль/дм}^3$  раствора.

Р е ш е н и е. Молярную концентрацию 35 %-го раствора азотной кислоты рассчитываем по формуле

$$C_{\text{HNO}_3(1)} = \frac{10 \cdot \rho \cdot \omega_{\text{HNO}_3}}{M_{\text{HNO}_3}} = \frac{10 \cdot 1,215 \cdot 35}{63,013} = 6,749 \text{ (моль/дм}^3\text{)}.$$

Необходимый объем  $6,749 \text{ моль/дм}^3$  раствора азотной кислоты для приготовления  $2 \text{ дм}^3$   $0,2500 \text{ моль/дм}^3$  раствора вычисляем по закону эквивалентов:

$$(C \cdot V)_{\text{HNO}_3(1)} = (C \cdot V)_{\text{HNO}_3(2)},$$

$$V_{\text{HNO}_3(1)} = \frac{(C \cdot V)_{\text{HNO}_3(2)}}{C_{\text{HNO}_3(1)}} = \frac{0,2500 \cdot 2}{6,749} = 0,074 \text{ (дм}^3\text{)} = 74 \text{ (см}^3\text{)}.$$

О т в е т:  $V(\text{HNO}_3) = 74 \text{ см}^3$ .

П р и м е р 3. Рассчитайте титр и молярную концентрацию раствора, полученного разбавлением  $50,0 \text{ см}^3$   $0,5050 \text{ моль/дм}^3$  раствора уксусной кислоты дистиллированной водой до объема  $250 \text{ см}^3$ .

Р е ш е н и е. Молярную концентрацию полученного раствора уксусной кислоты (2) рассчитываем по закону эквивалентов:

$$(C \cdot V)_{\text{CH}_3\text{COOH}(1)} = (C \cdot V)_{\text{CH}_3\text{COOH}(2)},$$

$$C_{\text{CH}_3\text{COOH}(2)} = \frac{(C \cdot V)_{\text{CH}_3\text{COOH}(1)}}{V_{\text{CH}_3\text{COOH}(2)}} = \frac{0,5050 \cdot 50}{250} = 0,1010 \text{ (моль / дм}^3\text{)}.$$

Титр раствора связан с молярной концентрацией соотношением

$$T_{\text{CH}_3\text{COOH}} = \frac{C_{\text{CH}_3\text{COOH}} \cdot M_{\text{CH}_3\text{COOH}}}{1000},$$

$$T_{\text{CH}_3\text{COOH}} = \frac{0,1010 \cdot 60,052}{1000} = 0,006065 \text{ (г/см}^3\text{)}.$$

О т в е т:  $C(\text{CH}_3\text{COOH}) = 0,1010 \text{ моль/дм}^3$ ;  $T(\text{CH}_3\text{COOH}) = 0,006065 \text{ г/см}^3$ .

П р и м е р 4. Рассчитайте объем воды, который следует добавить к  $250 \text{ см}^3$   $0,5000 \text{ моль/дм}^3$  раствора гидроксида натрия для получения раствора с титром  $0,005000 \text{ г/см}^3$ .

Р е ш е н и е. Титр полученного раствора переводим в молярную концентрацию по формуле

$$C_{\text{NaOH}} = \frac{1000 \cdot T_{\text{NaOH}}}{M_{\text{NaOH}}} = \frac{1000 \cdot 0,005000}{39,9971} = 0,1250 \text{ (моль/дм}^3\text{)}.$$

Объем полученного раствора гидроксида натрия (2) рассчитываем по закону эквивалентов:

$$(C \cdot V)_{\text{NaOH}(1)} = (C \cdot V)_{\text{NaOH}(2)},$$

$$V_{\text{NaOH}(2)} = \frac{(C \cdot V)_{\text{NaOH}(1)}}{C_{\text{NaOH}(2)}} = \frac{0,5000 \cdot 250}{0,1250} = 1000 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Объем воды, который следует добавить к  $250 \text{ см}^3$   $0,5000 \text{ моль/дм}^3$  раствора гидроксида натрия для получения  $1000 \text{ см}^3$  с титром  $0,005000 \text{ г/см}^3$ , равен

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{NaOH}(2)} - V_{\text{NaOH}(1)} = 1000 - 250 = 750 \text{ (см}^3\text{)}.$$

О т в е т:  $V(\text{H}_2\text{O}) = 750 \text{ см}^3$ .

П р и м е р 5. Рассчитайте молярную концентрацию и титр раствора, полученного смешением  $5 \text{ см}^3$  24 %-го раствора фос-



фосфорной кислоты плотностью 1,14 г/см<sup>3</sup> и 250,0 см<sup>3</sup> 0,1050 моль/дм<sup>3</sup> раствора того же вещества.

**Р е ш е н и е.** Массовую долю растворенного вещества в растворе фосфорной кислоты (1) переводим в молярную концентрацию по формуле

$$C_{\text{H}_3\text{PO}_4(1)} = \frac{10 \cdot \rho \cdot \omega_{\text{H}_3\text{PO}_4}}{M_{\text{H}_3\text{PO}_4}} = \frac{10 \cdot 1,14 \cdot 24}{97,995} = 2,7920 \text{ (моль/дм}^3\text{)}.$$

Количество вещества ( $v_{(3)}$ ) в полученном растворе будет равно сумме количеств веществ ( $v_{(1)}$  и  $v_{(2)}$ ), содержащихся в смешиваемых растворах:

$$v_{\text{H}_3\text{PO}_4(1)} + v_{\text{H}_3\text{PO}_4(2)} = v_{\text{H}_3\text{PO}_4(3)}.$$

Количество вещества связано с молярной концентрацией раствора и его объемом следующей формулой:

$$v = C \cdot V.$$

Тогда молярную концентрацию полученного раствора фосфорной кислоты рассчитываем из соотношения

$$(C \cdot V)_{\text{H}_3\text{PO}_4(1)} + (C \cdot V)_{\text{H}_3\text{PO}_4(2)} = (C \cdot V)_{\text{H}_3\text{PO}_4(3)},$$

$$C_{\text{H}_3\text{PO}_4(3)} = \frac{(C \cdot V)_{\text{H}_3\text{PO}_4(1)} + (C \cdot V)_{\text{H}_3\text{PO}_4(2)}}{V_{\text{H}_3\text{PO}_4(3)}},$$

$$V_{\text{H}_3\text{PO}_4(3)} = V_{\text{H}_3\text{PO}_4(1)} + V_{\text{H}_3\text{PO}_4(2)}.$$

Тогда

$$C_{\text{H}_3\text{PO}_4(3)} = \frac{2,7920 \cdot 5,0 + 0,1050 \cdot 250}{5,0 + 250,0} = 0,1577 \text{ (моль/дм}^3\text{)}.$$

Титр раствора связан с молярной концентрацией соотношением

$$T_{\text{H}_3\text{PO}_4(3)} = \frac{C_{\text{H}_3\text{PO}_4(3)} \cdot M_{\text{H}_3\text{PO}_4}}{1000},$$

$$T_{\text{H}_3\text{PO}_4(3)} = \frac{0,1577 \cdot 97,995}{1000} = 0,015454 \text{ (г/см}^3\text{)}.$$

О т в е т:  $C(\text{H}_3\text{PO}_4) = 0,1577 \text{ моль/дм}^3$ ;  $T(\text{H}_3\text{PO}_4) = 0,015454 \text{ г/см}^3$ .

П р и м е р 6. Смешаны  $400 \text{ см}^3$   $0,0405 \text{ моль/дм}^3$  раствора бромата калия и  $250 \text{ см}^3$   $0,2220 \text{ н}$  раствора того же вещества. Объем смеси разбавлен водой до  $1 \text{ дм}^3$ . Вычислите нормальную концентрацию приготовленного раствора.

Р е ш е н и е. Из уравнения полуреакции восстановления бромата



следует, что  $f_{\text{экв}}(\text{KBrO}_3) = 1/6$ . Следовательно, нормальная концентрация первого раствора равна

$$N_1(\text{KBrO}_3) = \frac{C_1(\text{KBrO}_3)}{f_{\text{экв}}(\text{KBrO}_3)} = 0,0405 \cdot 6 = 0,2430 \text{ (н)}.$$

По закону эквивалентов количество моль эквивалентов бромата калия в  $1 \text{ дм}^3$  приготовленного раствора равно

$$(N \cdot V)_1 + (N \cdot V)_2 = (N \cdot V)_3,$$

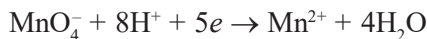
тогда

$$N_3 = \frac{(N \cdot V)_1 + (N \cdot V)_2}{V_3} = \frac{400 \cdot 0,2430 + 250 \cdot 0,2220}{1000} = 0,1527 \text{ (н)}.$$

О т в е т:  $N(\text{KBrO}_3) = 0,1527 \text{ н}$ .

П р и м е р 7. Вычислите массу технического перманганата калия, содержащего 3,3 % индифферентных примесей, которую следует взять для приготовления  $5 \text{ дм}^3$   $0,0850 \text{ н}$  раствора.

**Р е ш е н и е.** Из уравнения полуреакции восстановления перманганата в кислой среде



следует, что  $f_{\text{экв}}(\text{KMnO}_4) = 1/5$ ,  $M_{\text{экв}}(\text{KMnO}_4) = M(\text{KMnO}_4) \cdot f_{\text{экв}}(\text{KMnO}_4) = 31,6068 \text{ г/моль}$ .

Массу перманганата калия (без учета примесей), необходимую для приготовления раствора, рассчитываем по формуле

$$\begin{aligned} m(\text{KMnO}_4) &= \frac{(N \cdot V)_{\text{KMnO}_4} \cdot M_{\text{экв}}(\text{KMnO}_4)}{1000} = \\ &= \frac{0,0850 \cdot 5000 \cdot 31,6068}{1000} = 13,4329 \text{ (г)}. \end{aligned}$$

Навеску технического препарата (g) находим из формулы

$$\omega(\text{KMnO}_4) = \frac{m(\text{KMnO}_4)}{g} \cdot 100 \text{ \%}.$$

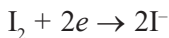
Итак,

$$\begin{aligned} g &= \frac{m(\text{KMnO}_4)}{\omega(\text{KMnO}_4)} \cdot 100\% = \frac{m(\text{KMnO}_4)}{100 - \omega(\text{примесей})} \cdot 100\% = \\ &= \frac{13,4329}{100 - 3,3} \cdot 100\% = 13,8913 \text{ (г)}. \end{aligned}$$

**О т в е т:**  $g = 13,8913 \text{ г}$ .

**П р и м е р 8.** Рассчитайте объем воды, который необходимо добавить к  $50,0 \text{ см}^3$   $0,0250 \text{ н}$  раствора йода, для получения раствора с титром  $0,00254 \text{ г/см}^3$ .

**Р е ш е н и е.** Из уравнения полуреакции восстановления йода



следует, что  $f_{\text{экв}}(\text{I}_2) = 1/2$ ,  $M_{\text{экв}}(\text{I}_2) = M(\text{I}_2) \cdot f_{\text{экв}}(\text{I}_2) = 126,9047 \text{ г/моль}$ .

Нормальная концентрация полученного раствора равна

$$N_2(I_2) = \frac{T(I_2) \cdot 1000}{M_{\text{экв}}(I_2)} = \frac{0,002540 \cdot 1000}{126,9047} = 0,0200 \text{ (н)}.$$

По закону эквивалентов

$$(N \cdot V)_1 = (N \cdot V)_2;$$

$$V_2 = \frac{(N \cdot V)_1}{N_2} = \frac{50,0 \cdot 0,0250}{0,0200} = 62,5 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Объем воды равен

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_2 - V_1 = 62,5 - 50,0 = 12,5 \text{ (см}^3\text{)}.$$

О т в е т:  $V(\text{H}_2\text{O}) = 12,5 \text{ см}^3$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

**186.** Вычислите молярную концентрацию раствора, полученного смешением 120 г 20 %-го раствора серной кислоты и 40 г 50 %-го раствора этого же вещества.

**187.** Рассчитайте объем 20,4 %-го раствора хлороводородной кислоты плотностью 1,10 г/см<sup>3</sup>, который следует взять для приготовления 1 дм<sup>3</sup> 0,2 моль/дм<sup>3</sup> раствора.

**188.** В 0,5 дм<sup>3</sup> дистиллированной воды растворили 40 г технического гидроксида натрия, содержащего 10 % примесей. Вычислите молярную концентрацию приготовленного раствора.

**189.** Рассчитайте, до какого объема следует разбавить 0,5 дм<sup>3</sup> 0,2000 моль/дм<sup>3</sup> раствора азотной кислоты, чтобы получить раствор с титром 0,006300 г/см<sup>3</sup>.

**190.** Рассчитайте объем 10 %-го раствора карбоната натрия плотностью 1,105 г/см<sup>3</sup>, необходимый для приготовления 250,0 мл раствора с титром 0,005300 г/см<sup>3</sup>.

**191.** Рассчитайте объем воды, который нужно добавить к  $0,4 \text{ дм}^3$   $0,5000 \text{ н}$  раствора гидроксида калия для получения раствора с титром  $0,005600 \text{ г/см}^3$ .

**192.** Вычислите объем  $40,25 \text{ \%}$ -го раствора серной кислоты плотностью  $1,305 \text{ г/см}^3$ , необходимый для приготовления  $1 \text{ дм}^3$   $0,1000 \text{ н}$  раствора серной кислоты.

**193.** Рассчитайте объем воды, который следует добавить к  $200,0 \text{ см}^3$   $0,5000 \text{ н}$  раствора муравьиной кислоты, чтобы получить раствор с титром  $0,004600 \text{ г/см}^3$ .

**194.** Рассчитайте объем  $20 \text{ \%}$ -го раствора аммиака плотностью  $0,922 \text{ г/см}^3$ , который следует добавить к  $1 \text{ дм}^3$   $0,5070 \text{ моль/дм}^3$  раствора этого же вещества для получения  $2,0000 \text{ моль/дм}^3$  раствора.

**195.** Рассчитайте объем  $30 \text{ \%}$ -го раствора хлороводородной кислоты плотностью  $1,15 \text{ г/см}^3$ , необходимый для приготовления  $1 \text{ дм}^3$  раствора с титром, равным  $0,003650 \text{ г/см}^3$ .

**196.** Рассчитайте объем  $1 \text{ моль/дм}^3$  раствора гидроксида натрия, который необходимо добавить к  $1 \text{ дм}^3$  раствора  $\text{NaOH}$  с титром  $0,004000 \text{ г/см}^3$ , чтобы приготовить  $0,25 \text{ моль/дм}^3$  раствор.

**197.** Рассчитайте титр раствора азотной кислоты, полученного разбавлением  $15 \text{ см}^3$   $17,6 \text{ \%}$ -го раствора азотной кислоты плотностью  $1,10 \text{ г/см}^3$  дистиллированной водой до объема  $1 \text{ дм}^3$ .

**198.** Рассчитайте, до какого объема следует разбавить  $14 \text{ см}^3$   $9,3 \text{ \%}$ -й серной кислоты плотностью  $1,05 \text{ г/см}^3$ , чтобы получить  $0,35 \text{ моль/дм}^3$  раствор.

**199.** Рассчитайте массу технического гидроксида калия, содержащего  $18 \text{ \%}$  индифферентных примесей, необходимую для приготовления  $250,0 \text{ см}^3$  раствора щелочи с титром по хлороводородной кислоте  $0,001823 \text{ г/см}^3$ .

**200.** Рассчитайте, до какого объема следует разбавить  $0,2 \text{ дм}^3$  раствора уксусной кислоты с титром  $0,015013 \text{ г/см}^3$ , чтобы получить  $0,1000 \text{ моль/дм}^3$  раствор.

**201.** Вычислите объем  $30 \text{ \%}$ -го раствора аммиака плотностью  $0,892 \text{ г/см}^3$ , необходимый для приготовления  $2 \text{ дм}^3$   $0,0200 \text{ моль/дм}^3$  раствора.

**202.** Навеску  $2,6230 \text{ г}$  дигидрата щавелевой кислоты растворили в дистиллированной воде в мерной колбе вместимостью

500,0 см<sup>3</sup>. Рассчитайте нормальную концентрацию и титр приготовленного раствора по гидроксиду калия.

**203.** Рассчитайте молярную концентрацию раствора, полученного разбавлением 8 см<sup>3</sup> 38,3 %-го раствора хлороводородной кислоты плотностью 1,19 г/см<sup>3</sup> дистиллированной водой до объема 1 дм<sup>3</sup>.

**204.** Рассчитайте нормальную концентрацию раствора серной кислоты, полученного разбавлением 13,5 см<sup>3</sup> 96 %-го раствора кислоты плотностью 1,84 г/см<sup>3</sup> до объема 2,5 дм<sup>3</sup>.

**205.** Рассчитайте объем воды, к которому следует добавить 200 см<sup>3</sup> 19,2 %-го раствора азотной кислоты плотностью 1,11 г/см<sup>3</sup>, чтобы приготовить 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствор кислоты.

**206.** Рассчитайте массу технической щелочи, содержащей 98 % гидроксида натрия, необходимую для приготовления 250 см<sup>3</sup> 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствора.

**207.** Вычислите титр раствора гидроксида калия, полученного растворением 0,8250 г технического гидроксида калия, содержащего 15 % индифферентных примесей, в 250 см<sup>3</sup> дистиллированной воды.

**208.** Рассчитайте молярную концентрацию раствора, полученного смешением 30 см<sup>3</sup> 15 %-го раствора карбоната натрия плотностью 1,16 г/см<sup>3</sup> и 90 см<sup>3</sup> дистиллированной воды.

**209.** Вычислите объем воды, который следует добавить к 1 дм<sup>3</sup> 0,5250 моль/дм<sup>3</sup> раствора аммиака для получения 0,4500 моль/дм<sup>3</sup> раствора.

**210.** Рассчитайте нормальную концентрацию раствора, полученного смешением 0,5 дм<sup>3</sup> 2 н раствора серной кислоты и 1,5 дм<sup>3</sup> 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствора того же вещества.

**211.** Вычислите нормальную концентрацию раствора, полученного смешиванием 550,0 см<sup>3</sup> 0,1925 н раствора хлороводородной кислоты и 50,0 см<sup>3</sup> раствора HCl с титром 0,023700 г/см<sup>3</sup>.

**212.** Рассчитайте объем воды, в котором следует растворить 161 г Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · 10H<sub>2</sub>O для приготовления 4 %-го раствора сульфата натрия.

**213.** Вычислите нормальную концентрацию раствора, полученного смешиванием 100,0 см<sup>3</sup> 0,2500 н раствора азотной кислоты и 500,0 см<sup>3</sup> раствора того же вещества с титром 0,006301 г/см<sup>3</sup>.

**214.** Рассчитайте молярную концентрацию раствора, полученного растворением  $109,5 \text{ г CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  в  $290,5 \text{ см}^3$  воды. Вычислите массовую долю хлорида кальция в этом растворе.

**215.** Вычислите нормальную концентрацию раствора гидроксида калия, полученного смешением  $2 \text{ дм}^3$  20 %-го раствора гидроксида калия плотностью  $1,176 \text{ г/см}^3$  и  $1 \text{ дм}^3$  12 %-го раствора того же вещества плотностью  $1,1 \text{ г/см}^3$ .

**216.** Определите молярную концентрацию, титр и титр по железу для  $0,1010 \text{ н}$  раствора перманганата калия.

**217.** Навеску  $5,200 \text{ г}$  дихромата калия растворили в мерной колбе вместимостью  $1000,0 \text{ см}^3$ . Вычислите нормальную концентрацию и титр по йоду раствора дихромата калия, предназначенного для титрования восстановителей в кислой среде.

**218.** Рассчитайте массу навески кристаллогидрата тиосульфата натрия  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , необходимую для приготовления  $250,0 \text{ см}^3$   $0,0330 \text{ н}$  раствора.

**219.** Вычислите объем воды, который следует добавить к  $800 \text{ см}^3$  раствора перманганата калия с титром  $0,003357 \text{ г/см}^3$ , чтобы получить  $0,1000 \text{ н}$  раствор, предназначенный для титрования восстановителей в кислой среде.

**220.** Навеску  $2,4500 \text{ г}$  дихромата калия растворили в мерной колбе вместимостью  $500,0 \text{ см}^3$ . Вычислите молярную концентрацию и титр раствора дихромата калия, предназначенного для титрования восстановителей в кислой среде.

**221.** Вычислите массу пентагидрата тиосульфата натрия, необходимую для приготовления  $4 \text{ дм}^3$  раствора с титром по меди  $0,01 \text{ г/см}^3$ .

**222.** Рассчитайте массу реагента, содержащего 98,27 % перманганата калия, необходимую для приготовления  $1 \text{ дм}^3$  раствора, предназначенного для титрования в кислой среде, с титром  $0,003300 \text{ г/см}^3$ .

**223.** Вычислите, до какого объема следует разбавить  $1500 \text{ см}^3$   $0,1000 \text{ н}$  раствора дихромата калия для получения раствора с титром по железу, равным  $0,005000 \text{ г/см}^3$ .

**224.** Рассчитайте нормальную концентрацию 30,1 %-го раствора азотной кислоты плотностью  $1,185 \text{ г/см}^3$  в реакциях окисления, если при этом азотная кислота восстанавливается до оксида азота (II).

**225.** Рассчитайте массу навески препарата, содержащего 95,63 % перманганата калия, необходимую для приготовления 1,2 дм<sup>3</sup> 0,0200 н раствора, предназначенного для титрования восстановителей в кислой среде.

**226.** Вычислите, до какого объема следует разбавить водой 100,0 см<sup>3</sup> 0,1155 н раствора дихромата калия для получения 0,0085 моль/дм<sup>3</sup> раствора.

**227.** Рассчитайте объем раствора тиосульфата натрия с титром 0,002947 г/см<sup>3</sup>, необходимый для приготовления 1,5 дм<sup>3</sup> 0,0100 моль/дм<sup>3</sup> раствора.

**228.** Рассчитайте массу реагента, содержащего 95,78 % перманганата калия, которую следует взять для приготовления 500 см<sup>3</sup> раствора с титром по железу 0,005932 г/см<sup>3</sup>.

**229.** Рассчитайте объем 1,000 н раствора дихромата калия, который необходимо добавить к 1300 см<sup>3</sup> раствора дихромата калия с титром по железу 0,004500 г/см<sup>3</sup>, чтобы получить 0,0895 н раствор.

**230.** Вычислите молярную концентрацию раствора тиосульфата натрия, полученного растворением 2,5500 г пентагидрата натрия в 0,1 дм<sup>3</sup> воды.

**231.** Вычислите нормальную и молярную концентрации раствора, полученного растворением в 500 см<sup>3</sup> воды 1,5268 г препарата, содержащего 75 % перманганата калия.

**232.** Смешали 300 дм<sup>3</sup> раствора, содержащего 1,56 г дихромата калия, и 400 дм<sup>3</sup> 0,0365 моль/дм<sup>3</sup> раствора этого же вещества. После этого смесь разбавили до 1 дм<sup>3</sup>. Вычислите нормальную концентрацию полученного раствора.

**233.** Рассчитайте массу оксалата натрия, необходимую для приготовления 100 см<sup>3</sup> 0,0500 н раствора, используемого при стандартизации раствора перманганата калия. Определите титр приготовленного раствора.

**234.** Вычислите объем раствора перманганата калия с титром 0,004420 г/см<sup>3</sup>, необходимый для приготовления 1,5 дм<sup>3</sup> 0,0150 н раствора, предназначенного для титрования восстановителей в кислой среде.



**235.** Вычислите массу дихромата калия, которую необходимо растворить в  $500,0 \text{ см}^3$  воды для получения раствора с титром по йоду  $0,007500 \text{ г/см}^3$ .

**236.** Рассчитайте титр и нормальную концентрацию раствора, полученного растворением  $0,9850 \text{ г}$  пентагидрата тиосульфата натрия в  $250 \text{ см}^3$  дистиллированной воды.

**237.** Навеска перманганата калия массой  $1,5050 \text{ г}$  растворена в воде в мерной колбе вместимостью  $200,0 \text{ см}^3$ . Аликвотная порция приготовленного раствора объемом  $25,0 \text{ см}^3$  разбавлена водой в мерной колбе вместимостью  $500,0 \text{ см}^3$ . Рассчитайте нормальную концентрацию и титр полученного раствора перманганата калия, предназначенного для титрования в кислой среде.

**238.** Вычислите объем раствора дихромата калия с титром по железу  $0,029419 \text{ г/см}^3$ , который можно приготовить из  $1,0000 \text{ г}$  дихромата калия.

**239.** Вычислите массу пентагидрата тиосульфата натрия, которая необходима для приготовления  $1,5 \text{ дм}^3$  раствора с титром по йоду  $0,001500 \text{ г/см}^3$ .

**240.** Рассчитайте, до какого объема необходимо разбавить  $1 \text{ дм}^3$   $0,1000 \text{ н}$  раствора перманганата калия, чтобы получить раствор с титром по железу  $0,001117 \text{ г/см}^3$ .

**241.** Молярная концентрация азотной кислоты составляет  $0,1121 \text{ моль/дм}^3$ . Вычислите нормальную концентрацию и титр раствора в реакциях восстановления до оксида азота (II).

**242.** В  $1 \text{ дм}^3$  растворили  $2,5000 \text{ г}$  дигидрата щавелевой кислоты. Вычислите нормальную концентрацию и титр приготовленного раствора.

**243.** Вычислите объем  $0,1000 \text{ моль/дм}^3$  раствора перманганата калия, необходимый для приготовления  $100 \text{ см}^3$   $0,0500 \text{ н}$  раствора.

**244.** Рассчитайте, до какого объема необходимо разбавить  $1 \text{ дм}^3$   $0,1000 \text{ н}$  раствора тиосульфата натрия, чтобы получить раствор с титром по меди  $0,003177 \text{ г/см}^3$ .

**245.** Рассчитайте массу технической щавелевой кислоты, содержащей  $4,8 \%$  индифферентных примесей, необходимую для приготовления  $250 \text{ см}^3$   $0,0500 \text{ н}$  раствора.

## Вычисление результатов титриметрических определений

Титриметрический метод — это один из основных видов количественного химического анализа, основанный на измерении точного объема раствора реагента, расходуемого на взаимодействие с определяемым веществом. При анализе раствор реагента (титрант) добавляют к анализируемому раствору малыми измеряемыми порциями. Эту операцию называют титрованием.

По способу выполнения различают прямое, обратное и косвенное титрование. Второй и третий способы применяют в тех случаях, когда прямое титрование затруднительно или невозможно.

*Прямое титрование* — наиболее простой и точный способ, заключающийся в следующем. К взвешенной пробе анализируемого вещества X, растворенной в подходящем растворителе, или к точно отмеренному объему, если вещество находится в растворе, прибавляют раствор реагента с точно установленной концентрацией  $N_R$  до тех пор, пока определяемый компонент X полностью не прореагирует с реагентом R:



После достижения конечной точки титрования (к. т. т.) — момента титрования, когда какое-либо физическое свойство системы меняется скачкообразно — фиксируют объем раствора реагента  $V_R$ , израсходованного на взаимодействие с определяемым веществом.

При определении вещества X, взятого в объеме  $V_X$ , титрованием рабочим раствором известной концентрации  $N_R$ , концентрацию определяемого вещества вычисляют по закону эквивалентов:

$$(N \cdot V)_X = (N \cdot V)_R. \quad (2.8)$$

Откуда

$$N_X = \frac{(N \cdot V)_R}{V_X}. \quad (2.9)$$

Массу вещества в граммах, содержащуюся в некотором объеме раствора неизвестной концентрации, вычисляют на основе данных титрования по формуле

$$m_x = \frac{(N \cdot V)_R \cdot M_{\text{экв(X)}}}{1000}. \quad (2.10)$$

В том случае, если для титрования была отобрана определенная порция анализируемого раствора  $V_{\text{ал}}$  (аликвотная часть) из общего объема  $V_o$ , то уравнение преобразуется:

$$m_x = \frac{(N \cdot V)_R \cdot M_{\text{экв(X)}}}{1000} \cdot \frac{V_o}{V_{\text{ал}}}. \quad (2.11)$$

Нередко необходимо найти массовую долю компонента в анализируемом образце. Для этого на аналитических весах берут точную навеску пробы ( $g$ , г), растворяют и титруют полученный раствор рабочим раствором реагента. Массовую долю (%) определяемого вещества вычисляют по формуле

$$\omega_x = \frac{(N \cdot V)_R \cdot M_{\text{экв(X)}}}{10 \cdot g}. \quad (2.12)$$

Если для титрования была отобрана аликвотная порция анализируемого раствора из общего объема  $V_o$ , то формула преобразуется:

$$\omega_x = \frac{(N \cdot V)_R \cdot M_{\text{экв(X)}}}{10g} \cdot \frac{V_o}{V_{\text{ал}}}. \quad (2.13)$$

*Обратное титрование* заключается в том, что к раствору анализируемой пробы добавляют точно измеренный объем стандартного раствора, содержащего заведомо в избытке реагирующий с аналитом вспомогательный реагент  $R_1$ , а затем не вступивший в реакцию остаток этого реагента оттитровывают стандартным раствором другого реагента  $R_2$  (титрантом).

Количество определяемого вещества (аналита) находят по разности количеств веществ добавленного в избытке вспомога-

ного реагента  $R_1$  и пошедшего на обратное титрование титранта  $R_2$ :

$$(N \cdot V)_X = (N \cdot V)_{R_1} - (N \cdot V)_{R_2}.$$

Тогда массу и массовую долю analyта X можно найти по формулам соответственно, %:

$$m_X = \frac{[(N \cdot V)_{R_1} - (N \cdot V)_{R_2}] \cdot M_{\text{экв}(X)}}{1000}, \quad (2.14)$$

$$\omega_X = \frac{[(N \cdot V)_{R_1} - (N \cdot V)_{R_2}] \cdot M_{\text{экв}(X)}}{10g}. \quad (2.15)$$

В том случае, если для титрования была отобрана аликвотная часть анализируемого раствора из мерной колбы вместимостью  $V_o$ , то уравнения преобразуются:

$$m_X = \frac{[(N \cdot V)_{R_1} - (N \cdot V)_{R_2}] \cdot M_{\text{экв}(X)}}{1000} \cdot \frac{V_o}{V_{\text{ал}}}, \quad (2.16)$$

$$\omega_X = \frac{[(N \cdot V)_{R_1} - (N \cdot V)_{R_2}] \cdot M_{\text{экв}(X)}}{10g} \cdot \frac{V_o}{V_{\text{ал}}}. \quad (2.17)$$

*Косвенное титрование* (титрование заместителя, или заместительное титрование) применяют в тех случаях, когда определяемый компонент с титрантом непосредственно не взаимодействует или реакция между ними протекает медленно или нестехиометрично. К анализируемому раствору определяемого вещества X добавляют избыток вспомогательного реагента B, с которым analyт вступает в реакцию:



с образованием эквивалентного количества нового соединения D — заместителя, легко определяемого титрованием стандартным раствором реагента-титранта R:



Количество вещества заместителя D эквивалентно количеству вещества определяемого компонента X:

$$(N \cdot V)_X = (N \cdot V)_D = (N \cdot V)_R.$$

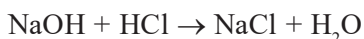
Расчет результатов проводят по формулам, используемым в методе прямого титрования.

При любом способе титрования можно использовать два метода: титрование отдельных навесок пробы и метод пипетирования. В последнем случае из приготовленного в мерной колбе раствора пробы мерной пипеткой отбирают аликвотные части (объемы) для титрования. Пипетирование – менее трудоемкий прием, однако и менее точный, чем метод отдельных навесок.

## РЕШЕНИЕ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

**Пр и м е р 1.** На титрование 10,0 см<sup>3</sup> раствора гидроксида натрия затрачено 15,4 см<sup>3</sup> 0,1000 н раствора хлороводородной кислоты. Вычислите нормальную концентрацию раствора щелочи.

**Р е ш е н и е.** При титровании раствора гидроксида натрия раствором хлороводородной кислоты протекает реакция



В соответствии с законом эквивалентов (2.8) число молей эквивалента титранта равно числу молей эквивалента определяемого компонента:

$$(N \cdot V)_{\text{NaOH}} = (N \cdot V)_{\text{HCl}}.$$

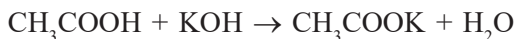
Тогда нормальную концентрацию раствора гидроксида натрия можно рассчитать по формуле (2.9)

$$N_{\text{NaOH}} = \frac{(N \cdot V)_{\text{HCl}}}{V_{\text{NaOH}}} = \frac{0,1000 \cdot 15,4}{10,0} = 0,1540 \text{ (н)}.$$

**О т в е т:**  $N(\text{NaOH}) = 0,1540$  моль/дм<sup>3</sup>.

**П р и м е р 2.** Вычислите массу уксусной кислоты в растворе, на титрование которого израсходовано  $12,7 \text{ см}^3 0,1085 \text{ н}$  раствора гидроксида калия.

**Р е ш е н и е.** При титровании раствора уксусной кислоты раствором гидроксида калия протекает реакция



Поскольку 1 моль  $\text{CH}_3\text{COOH}$  содержит 1 ион водорода, вступающий в реакцию со щелочью, то  $f_{\text{экв}}(\text{CH}_3\text{COOH}) = 1$ ,  $M_{\text{экв}}(\text{CH}_3\text{COOH}) = M(\text{CH}_3\text{COOH}) \cdot f_{\text{экв}}(\text{CH}_3\text{COOH}) = 60,052 \text{ г/моль}$ .

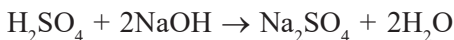
Массу уксусной кислоты, содержащейся в анализируемом растворе, рассчитываем по формуле (2.10):

$$\begin{aligned} m_{\text{CH}_3\text{COOH}} &= \frac{(N \cdot V)_{\text{KOH}} \cdot M_{\text{экв}}(\text{CH}_3\text{COOH})}{1000} = \\ &= \frac{0,1085 \cdot 12,7 \cdot 60,052}{1000} = 0,0827 \text{ (г)}. \end{aligned}$$

**О т в е т:**  $m(\text{CH}_3\text{COOH}) = 0,0827 \text{ г}$ .

**П р и м е р 3.** Вычислите массу серной кислоты, содержащейся в  $250,0 \text{ см}^3$  раствора, если на титрование  $10,0 \text{ см}^3$  этого раствора израсходовано  $9,3 \text{ см}^3 0,1096 \text{ моль/дм}^3$  раствора гидроксида натрия.

**Р е ш е н и е.** Взаимодействие раствора серной кислоты с раствором гидроксида натрия протекает по уравнению



Поскольку 1 моль  $\text{H}_2\text{SO}_4$  содержит 2 иона водорода, вступающих в реакцию со щелочью, то  $f_{\text{экв}}(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1/2$ ,  $M_{\text{экв}}(\text{H}_2\text{SO}_4) = M(\text{H}_2\text{SO}_4) \cdot f_{\text{экв}}(\text{H}_2\text{SO}_4) = 49,040 \text{ г/моль}$ .

Поскольку для проведения определения была отобрана аликвотная порция раствора серной кислоты, то массу серной кислоты,

содержащейся в общем объеме раствора, можно рассчитать по формуле (2.11):

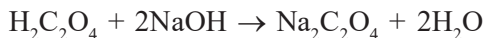
$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{(N \cdot V)_{\text{NaOH}} \cdot M_{\text{экв}(\text{H}_2\text{SO}_4)}}{1000} \cdot \frac{V_o}{V_{\text{ал}}} =$$

$$= \frac{0,1096 \cdot 9,3 \cdot 49,040}{1000} \cdot \frac{250,0}{10,0} = 1,2496 \text{ (г)}.$$

О т в е т:  $m(\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,2496 \text{ г}$ .

П р и м е р 4. На титрование 0,3451 г щавелевой кислоты было израсходовано 21,4 см<sup>3</sup> раствора гидроксида натрия. Рассчитайте: а) нормальную концентрацию раствора NaOH; б) его титр; в) его титр по H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

Р е ш е н и е. Взаимодействие щавелевой кислоты с раствором гидроксида натрия протекает по уравнению реакции



В данной реакции одна молекула H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> эквивалентна двум ионам водорода, следовательно,  $f_{\text{экв}}(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4) = 1/2$ ,  $M_{\text{экв}}(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4) = M(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4) \cdot f_{\text{экв}}(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4) = 45,0175 \text{ г/моль}$ . Фактор эквивалентности гидроксида натрия равен  $f_{\text{экв}}(\text{NaOH}) = 1$ , так как с двумя молекулами щелочи вступает во взаимодействие одна молекула кислоты, содержащая два иона водорода.

Масса определяемого вещества связана с количеством титранта выражением (2.10):

$$m_{\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4} = \frac{(N \cdot V)_{\text{NaOH}} \cdot M_{\text{экв}(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4)}}{1000}.$$

Тогда нормальную концентрацию раствора гидроксида натрия рассчитываем по формуле

$$N_{\text{NaOH}} = \frac{1000 \cdot m_{\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4}}{V_{\text{NaOH}} \cdot M_{\text{экв}(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4)}} = \frac{1000 \cdot 0,3451}{21,4 \cdot 45,0175} = 0,3582 \text{ (н)}.$$

Титр  $T(\text{NaOH})$  и титр по щавелевой кислоте  $T(\text{NaOH}/\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4)$  можно рассчитать по формулам

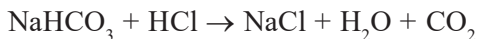
$$T_{\text{NaOH}} = \frac{N_{\text{NaOH}} \cdot M_{\text{экв}(\text{NaOH})}}{1000} = \frac{0,3582 \cdot 39,9971}{1000} = 1,432 \cdot 10^{-2} (\text{г/см}^3).$$

$$\begin{aligned} T_{\text{NaOH}/\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4} &= \frac{N_{\text{NaOH}} \cdot M_{\text{экв}(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4)}}{1000} = \frac{0,3582 \cdot 45,0175}{1000} = \\ &= 1,612 \cdot 10^{-2} (\text{г/см}^3). \end{aligned}$$

О т в е т: а)  $N(\text{NaOH}) = 0,3582$  моль/дм<sup>3</sup>; б)  $T(\text{NaOH}) = 1,432 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>; в)  $T(\text{NaOH}/\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4) = 1,612 \cdot 10^{-2}$  г/см<sup>3</sup>.

П р и м е р 5. На титрование 0,4478 г навески, состоящей из смеси гидрокарбоната натрия и хлорида натрия, потребовалось 18,8 см<sup>3</sup> 0,0998 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты. Вычислите массовые доли солей в смеси.

Р е ш е н и е. Хлороводородная кислота, используемая в качестве титранта при анализе смеси  $\text{NaHCO}_3$  и  $\text{NaCl}$ , будет взаимодействовать только с гидрокарбонатом натрия по уравнению



В данной реакции одна молекула  $\text{NaHCO}_3$  эквивалента одному иону водорода, следовательно,  $f_{\text{экв}}(\text{NaHCO}_3) = 1$ ,  $M_{\text{экв}}(\text{NaHCO}_3) = M(\text{NaHCO}_3) \cdot f_{\text{экв}}(\text{NaHCO}_3) = 84,007$  г/моль.

Определение гидрокарбоната натрия проводят методом прямого титрования, по результатам которого массовая доля определяемого вещества рассчитывается по формуле (2.12):

$$\omega_{\text{NaHCO}_3} = \frac{(N \cdot V)_{\text{HCl}} \cdot M_{\text{экв}(\text{NaHCO}_3)}}{10 \cdot g} = \frac{0,0998 \cdot 18,8 \cdot 84,007}{10 \cdot 0,4478} = 35,20 (\%).$$

Массовая доля хлорида натрия в анализируемой смеси равна

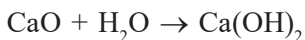
$$\omega_{\text{NaCl}} = 100 - \omega_{\text{NaHCO}_3} = 100 - 35,20 = 64,80 (\%).$$

О т в е т:  $\omega(\text{NaHCO}_3) = 35,20 \%$ ,  $\omega(\text{NaCl}) = 64,80 \%$ .

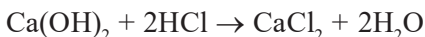


**П р и м е р 6.** Рассчитайте массу навески негашеной извести, содержащей 90 % CaO и индифферентные примеси, на титрование водного раствора которой затрачено 18,5 см<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты с титром 0,01030 г/см<sup>3</sup>.

**Р е ш е н и е.** При растворении навески негашеной извести в воде образуется гидроксид кальция:



Взаимодействие гашеной извести с раствором хлороводородной кислоты протекает по уравнению



В первой реакции 1 молю CaO соответствует 1 моль Ca(OH)<sub>2</sub>, во второй реакции 1 молекула Ca(OH)<sub>2</sub> реагирует с 2 ионами водорода, следовательно,  $f_{\text{экв}}(\text{CaO}) = 1/2$ ,  $M_{\text{экв}}(\text{CaO}) = M(\text{CaO}) \cdot f_{\text{экв}}(\text{CaO}) = 28,039$  г/моль.

Рассчитываем нормальную концентрацию раствора титранта по известному титру, используя приведенную в табл. 1 формулу перехода:

$$N_{\text{HCl}} = \frac{1000 \cdot T_{\text{HCl}}}{M_{\text{экв(HCl)}}} = \frac{1000 \cdot 0,01030}{36,461} = 0,2825 \text{ (н)}.$$

Массу навески негашеной извести (g, г) выражаем из формулы (2.12):

$$g = \frac{(N \cdot V)_{\text{HCl}} \cdot M_{\text{экв(CaO)}}}{10 \cdot \omega_{\text{CaO}}} = \frac{0,2825 \cdot 18,5 \cdot 28,039}{10 \cdot 90} = 0,1628 \text{ (г)}.$$

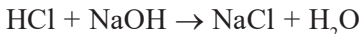
**О т в е т:**  $g = 0,1628$  г.

**П р и м е р 7.** Через 25,0 см<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты с титром 0,006970 г/см<sup>3</sup> пропущен газ, содержащий аммиак, на титрование избытка кислоты израсходовано 7,3 см<sup>3</sup> 0,1021 моль/дм<sup>3</sup> раствора гидроксида натрия. Рассчитайте массу поглощенного аммиака.

**Р е ш е н и е.** Определение аммиака в данном случае проводят методом обратного титрования. При пропускании через раствор хлороводородной кислоты газа, содержащего аммиак, протекает реакция



Избыточное количество HCl оттитровывают раствором щелочи:



Поскольку взаимодействие аммиака с раствором хлороводородной кислоты соответствует эквимольному соотношению, то  $f_{\text{экв}}(\text{NH}_3) = 1$ .

Используя титр раствора хлороводородной кислоты, рассчитываем его нормальную концентрацию по формуле, представленной в табл. 1:

$$N_{\text{HCl}} = \frac{1000 \cdot T_{\text{HCl}}}{M_{\text{экв}(\text{HCl})}} = \frac{1000 \cdot 0,006970}{36,461} = 0,1912 \text{ (н)}.$$

Общее число молей эквивалентов хлороводородной кислоты затрачивается на взаимодействие и с аммиаком, и с гидроксидом натрия:

$$(N \cdot V)_{\text{HCl}} = (N \cdot V)_{\text{NH}_3} + (N \cdot V)_{\text{NaOH}}.$$

Отсюда следует, что

$$(N \cdot V)_{\text{NH}_3} = (N \cdot V)_{\text{HCl}} - (N \cdot V)_{\text{NaOH}}.$$

Масса определяемого вещества связана с его количеством выражением

$$\begin{aligned} m_{\text{NH}_3} &= \frac{(N \cdot V)_{\text{NH}_3} \cdot M_{\text{экв}(\text{NH}_3)}}{1000} = \frac{[(N \cdot V)_{\text{HCl}} - (N \cdot V)_{\text{NaOH}}] \cdot M_{\text{экв}(\text{NH}_3)}}{1000} = \\ &= \frac{[0,1912 \cdot 25,0 - 0,1021 \cdot 7,3] \cdot 17,0305}{1000} = 0,0687 \text{ (г)}. \end{aligned}$$

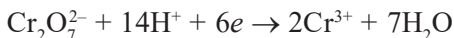
**О т в е т:**  $m(\text{NH}_3) = 0,0687 \text{ г}$ .

**П р и м е р 8.** Навеску дихромата калия массой 0,2940 г растворили в мерной колбе вместимостью 100,0 см<sup>3</sup>. На титрование 10,0 см<sup>3</sup> раствора, содержащего сульфат железа (II), израсходовали 12,4 см<sup>3</sup> приготовленного раствора дихромата. Вычислите нормальную концентрацию раствора FeSO<sub>4</sub> и массу железа, содержащегося в анализе.

**Р е ш е н и е.** При взаимодействии раствора сульфата железа (II) с раствором перманганата калия ионы Fe<sup>2+</sup> окисляются до Fe<sup>3+</sup>:



Это одноэлектронный переход, поэтому  $f_{\text{экв}}(\text{FeSO}_4) = f_{\text{экв}}(\text{Fe}) = 1$ . Согласно полуреакции



процесс восстановления сопровождается присоединением 6 электронов, поэтому  $f_{\text{экв}}(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) = 1/6$ ,  $M_{\text{экв}}(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) = M(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) \times \times f_{\text{экв}}(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7) = 49,031 \text{ г/моль}$ .

Нормальная концентрация приготовленного раствора дихромата калия равна

$$N_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} = \frac{1000 \cdot m_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}}{V_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} \cdot M_{\text{экв}}(\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7)} = \frac{1000 \cdot 0,2940}{100,0 \cdot 49,031} = 0,0600 \text{ (н)}.$$

В точке эквивалентности

$$(N \cdot V)_{\text{FeSO}_4} = (N \cdot V)_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}.$$

Следовательно,

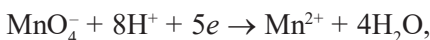
$$N_{\text{FeSO}_4} = \frac{(N \cdot V)_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7}}{V_{\text{FeSO}_4}} = \frac{0,0600 \cdot 12,4}{10,0} = 0,0744 \text{ (н)},$$

$$m_{\text{Fe}} = \frac{(N \cdot V)_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} \cdot M_{\text{экв}}(\text{Fe})}{1000} = \frac{0,0600 \cdot 12,4 \cdot 55,847}{1000} = 0,042 \text{ (г)}.$$

**О т в е т:**  $N(\text{FeSO}_4) = 0,0744 \text{ н}$ ;  $m(\text{Fe}) = 0,042 \text{ г}$ .

**Пример 9.** Вычислите объем 0,0400 моль/дм<sup>3</sup> раствора перманганата калия, который расходуется на титрование 0,1551 г оксалата аммония в кислой среде.

**Решение.** При восстановлении перманганата в кислой среде протекает полуреакция



сопровождающаяся присоединением 5 электронов, следовательно,  $f_{\text{экв}}(\text{KMnO}_4) = 1/5$ ,  $M_{\text{экв}}(\text{KMnO}_4) = M(\text{KMnO}_4) \cdot f_{\text{экв}}(\text{KMnO}_4) = 31,6068 \text{ г/моль}$ .

Нормальная концентрация связана с молярной выражением

$$N_{\text{KMnO}_4} = \frac{C_{\text{KMnO}_4}}{f_{\text{экв}}(\text{KMnO}_4)} = \frac{0,0400}{1/5} = 0,2000 \text{ (н)}.$$

Оксалат-ион окисляется согласно полуреакции



Следовательно,  $f_{\text{экв}}((\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4) = 1/2$ ,  $M_{\text{экв}}((\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4) = M((\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4) \cdot f_{\text{экв}}((\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4) = 62,0484 \text{ г/моль}$ .

Масса определяемого вещества  $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$  связана с количеством моль эквивалентов титранта  $\text{KMnO}_4$  выражением (2.10):

$$m_{(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4} = \frac{(N \cdot V)_{\text{KMnO}_4} \cdot M_{\text{экв}}((\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4)}{1000}.$$

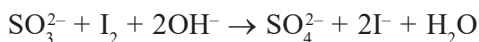
Отсюда

$$V_{\text{KMnO}_4} = \frac{1000 \cdot m_{(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4}}{N_{\text{KMnO}_4} \cdot M_{\text{экв}}((\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4)} = \frac{1000 \cdot 0,1551}{0,2000 \cdot 62,0484} = 12,5 \text{ (см}^3\text{)}.$$

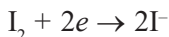
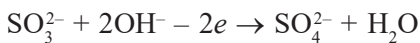
**О т в е т:**  $V(\text{KMnO}_4) = 12,5 \text{ см}^3$ .

**П р и м е р 10.** Технический образец сульфита натрия массой 8,9050 г растворили в мерной колбе вместимостью 500,0 см<sup>3</sup>. К 20,0 см<sup>3</sup> приготовленного раствора добавили 40,0 см<sup>3</sup> 0,1868 н раствора йода, на титрование избытка которого израсходовано 41,25 см<sup>3</sup> 0,0952 н раствора тиосульфата натрия. Вычислите массовую долю сульфита натрия в анализируемом образце.

**Р е ш е н и е.** Определение сульфита натрия в техническом образце проводят методом обратного титрования. Взаимодействие сульфита натрия с йодом протекает в соответствии с уравнением реакции

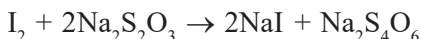


и полуреакциями



Из уравнений полуреакций следует, что  $f_{\text{экв}}(\text{Na}_2\text{SO}_3) = f_{\text{экв}}(\text{I}_2) = 1/2$ .

Избыток йода оттитровывают раствором тиосульфата натрия, при этом протекает химическая реакция



Общее количество моль эквивалентов йода расходуется на взаимодействие и с сульфитом натрия, и с тиосульфатом натрия, следовательно,

$$(N \cdot V)_{\text{I}_2} = (N \cdot V)_{\text{Na}_2\text{SO}_3} + (N \cdot V)_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}.$$

Отсюда следует, что

$$(N \cdot V)_{\text{Na}_2\text{SO}_3} = (N \cdot V)_{\text{I}_2} - (N \cdot V)_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}.$$

Массовую долю определяемого вещества вычисляем по формуле (2.13):

$$\begin{aligned}\omega_{\text{Na}_2\text{SO}_3} &= \frac{(N \cdot V)_{\text{Na}_2\text{SO}_3} \cdot M_{\text{экв}(\text{Na}_2\text{SO}_3)}}{10 \cdot g} \cdot \frac{V_o}{V_{\text{ал}}} = \\ &= \frac{[(N \cdot V)_{\text{I}_2} - (N \cdot V)_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}] \cdot M_{\text{экв}(\text{Na}_2\text{SO}_3)}}{10 \cdot g} \cdot \frac{V_o}{V_{\text{ал}}} = \\ &= \frac{[0,1868 \cdot 40,0 - 0,0952 \cdot 41,25] \cdot 63,02}{10 \cdot 8,9050} \cdot \frac{500,0}{20,0} = 62,7 (\%).\end{aligned}$$

О т в е т:  $\omega((\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4) = 62,7 \%$ .

П р и м е р 11. Определите молярную концентрацию рабочего раствора ЭДТА (комплексона III), если на титрование навески металлического цинка массой 0,0131 г затрачено 18,5 см<sup>3</sup> этого раствора.

Р е ш е н и е. В результате взаимодействия комплексона III с ионами металлов (кроме щелочных) образуется комплекс с соотношением компонентов 1 : 1, независимо от заряда иона. Следовательно, при вычислении результатов комплексонометрического титрования вместо нормальной концентрации титранта удобнее использовать молярную концентрацию, а вместо молярной массы эквивалента вещества — его молярную массу.

Таким образом, для вычисления молярной концентрации по результатам прямого комплексонометрического титрования можно использовать формулу

$$m_{\text{Zn}} = \frac{(C \cdot V)_{\text{к. III}} \cdot M_{\text{Zn}}}{1000}.$$

Отсюда

$$C_{\text{ЭДТА}} = \frac{1000 \cdot m_{\text{Zn}}}{V_{\text{к. III}} \cdot M_{\text{Zn}}} = \frac{1000 \cdot 0,0131}{18,5 \cdot 65,38} = 0,0108 \text{ (моль/дм}^3\text{)}.$$

О т в е т:  $C(\text{ЭДТА}) = 0,0108 \text{ моль/дм}^3$ .

**П р и м е р 12.** При определении железа в сточной воде объемом 200,0 см<sup>3</sup> его окислили до трехвалентного и после отделения мешающих компонентов оттитровали 5,15 см<sup>3</sup> 0,0050 моль/дм<sup>3</sup> раствором комплексона III. Определите массовую концентрацию (мг/дм<sup>3</sup>) железа в сточной воде.

**Р е ш е н и е.** Если через  $C_m(\text{Fe})$  обозначить массовую концентрацию железа в сточной воде, то можно записать

$$C_m(\text{Fe}) = \frac{m_{\text{Fe}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}}.$$

Массу определяемого вещества по результатам прямого титрования рассчитываем по формуле

$$m_{\text{Fe}} = \frac{(C \cdot V)_{\text{К.III}} \cdot M_{\text{Fe}}}{1000}.$$

Комбинируя формулы и подставляя численные значения, получаем

$$\begin{aligned} C_m(\text{Fe}) &= \frac{m_{\text{Fe}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{(C \cdot V)_{\text{К.III}} \cdot M_{\text{Fe}}}{1000 \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{0,0050 \cdot 5,15 \cdot 55,847}{1000 \cdot 0,200} = \\ &= 0,0072 \text{ (г/дм}^3\text{)} = 7,2 \text{ (мг/дм}^3\text{)}. \end{aligned}$$

**О т в е т:**  $C_m(\text{Fe}) = 7,2 \text{ мг/дм}^3$ .

**П р и м е р 13.** Вычислите массу ртути, содержащейся в 50,0 см<sup>3</sup> раствора, если после прибавления к нему 20,0 см<sup>3</sup> 0,0100 моль/дм<sup>3</sup> раствора ЭДТА избыток его оттитровали 5,5 см<sup>3</sup> 0,0095 моль/дм<sup>3</sup> раствора сульфата магния.

**Р е ш е н и е.** Определение ртути в растворе проводят методом обратного комплексонометрического титрования. Общее количество ЭДТА расходуется на взаимодействие и с ионами ртути, содержащимися в анализируемом растворе, и с сульфатом магния:

$$(C \cdot V)_{\text{К.III}} = (C \cdot V)_{\text{Hg}} + (C \cdot V)_{\text{MgSO}_4}.$$

Отсюда следует, что

$$(C \cdot V)_{\text{Hg}} = (C \cdot V)_{\text{к. III}} - (C \cdot V)_{\text{MgSO}_4}.$$

Масса определяемого вещества связана с его количеством и массой пробы выражением

$$\begin{aligned} m_{\text{Hg}} &= \frac{(C \cdot V)_{\text{Hg}} \cdot M_{\text{Hg}}}{1000} = \frac{[(C \cdot V)_{\text{к. III}} - (C \cdot V)_{\text{MgSO}_4}] \cdot M_{\text{Hg}}}{1000} = \\ &= \frac{[0,0100 \cdot 20,0 - 0,0095 \cdot 5,5] \cdot 200,59}{1000} = 0,030 \text{ (г)}. \end{aligned}$$

О т в е т:  $m(\text{Hg}) = 0,030 \text{ г.}$

**П р и м е р 14.** К раствору, полученному после растворения навески анализируемой пробы массой 0,1500 г, содержащей галлий (III), добавили буферный раствор со значением pH 10,0 и избыток комплексоната магния  $\text{MgY}^{2-}$ . На титрование выделившихся ионов магния  $\text{Mg}(\text{II})$  с эриохромом черным Т израсходовали 5,9 см<sup>3</sup> 0,0701 моль/дм<sup>3</sup> раствора комплексона III. Рассчитайте массовую долю галлия в навеске.

**Р е ш е н и е.** При титровании по методу замещения количество моль комплексона III, затраченное на титрование выделившегося магния (II), равно количеству моль галлия (III) в растворе

$$(C \cdot V)_{\text{к. III}} = (C \cdot V)_{\text{Mg}} = (C \cdot V)_{\text{Ga}}.$$

Тогда массовую долю определяемого вещества можно вычислить по формуле:

$$\omega_{\text{Ga}} = \frac{(C \cdot V)_{\text{к. III}} \cdot M_{\text{Ga}}}{10 \cdot g} = \frac{0,0701 \cdot 5,9 \cdot 69,723}{10 \cdot 0,1500} = 19,2 \text{ (\%)}.$$

О т в е т:  $\omega(\text{Ga}) = 19,2 \text{ \%}.$



## КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

**246.** На титрование  $200\text{ см}^3$  воды производственного назначения в присутствии метилового оранжевого затрачено  $10,0\text{ см}^3$  раствора хлороводородной кислоты с титром  $0,001760\text{ г/см}^3$ . Вычислите временную жесткость анализируемой воды.

**247.** На титрование  $10,0\text{ см}^3$  раствора азотной кислоты израсходовано  $15,0\text{ см}^3$  раствора гидроксида калия с титром  $0,005600\text{ г/см}^3$ . Рассчитайте нормальную концентрацию азотной кислоты.

**248.** На титрование навески технической молочной кислоты  $\text{CH}_3\text{CHONCOOH}$  массой  $0,2045\text{ г}$  затрачено  $15,8\text{ см}^3$   $0,1010\text{ н}$  раствора гидроксида натрия. Рассчитайте массовую долю молочной кислоты в анализируемом образце.

**249.** Навеска пищевого уксуса массой  $9,3600\text{ г}$  растворена в мерной колбе вместимостью  $1\text{ дм}^3$ , на титрование  $10,0\text{ см}^3$  полученного раствора израсходовано  $10,5\text{ см}^3$   $0,1040\text{ н}$  раствора гидроксида калия. Вычислите массовую долю уксусной кислоты в анализируемом пищевом уксусе.

**250.** Технический препарат лимонной кислоты  $\text{C}_3\text{H}_4\text{ON}(\text{COOH})_3$  содержит  $99,50\%$  кислоты (в пересчете на моногидрат). Рассчитайте объем  $0,1010\text{ н}$  раствора гидроксида натрия, затраченный на титрование навески препарата массой  $0,1150\text{ г}$ .

**251.** На титрование  $10,0\text{ см}^3$  раствора, полученного разбавлением  $20,0\text{ см}^3$  столового уксуса в мерной колбе вместимостью  $200,0\text{ см}^3$ , затрачено  $12,5\text{ см}^3$   $0,0995\text{ н}$  раствора гидроксида натрия. Рассчитайте массу уксусной кислоты в анализируемом столовом уксусе.

**252.** Вычислите массу навески препарата, содержащего  $2,5\%$  муравьиной кислоты, которую необходимо взять, чтобы на титрование пробы расходовалось не менее  $10,0\text{ см}^3$   $0,0215\text{ н}$  раствора гидроксида калия.

**253.** Навеску щавелевой кислоты массой  $0,6000\text{ г}$  растворили в мерной колбе вместимостью  $100,0\text{ см}^3$ . На титрование  $20,0\text{ см}^3$  полученного раствора израсходовали  $18,35\text{ см}^3$  раствора гидроксида натрия. Определите нормальную концентрацию раствора титранта.

**254.** Навеску щелочи массой  $0,5341\text{ г}$ , содержащей  $92\%$  гидроксида натрия и индифферентные примеси, растворили в мерной кол-

бе вместимостью 100,0 см<sup>3</sup>. Определите нормальную концентрацию хлороводородной кислоты, если на титрование 15,0 см<sup>3</sup> приготовленного раствора щелочи израсходовали 19,5 см<sup>3</sup> кислоты.

**255.** Определите молярную концентрацию раствора гидроксида калия, если на титрование 15,0 см<sup>3</sup> этого раствора израсходовано 18,7 см<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты с титром 0,002864 г/см<sup>3</sup>.

**256.** Рассчитайте массу дигидрата щавелевой кислоты  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , которую необходимо взять, чтобы на ее титрование было израсходовано 20,0 см<sup>3</sup> 0,1056 н раствора гидроксида калия.

**257.** Вычислите массу препарата, содержащего 90 % карбоната натрия и индифферентные примеси, которую необходимо взять, чтобы на ее титрование с метиловым оранжевым было израсходовано 20,0 см<sup>3</sup> 0,1000 н раствора хлороводородной кислоты.

**258.** Навеску неизвестного вещества массой 2,000 г растворили в мерной колбе вместимостью 100,0 см<sup>3</sup>. На титрование 25,0 см<sup>3</sup> приготовленного раствора израсходовано 20,0 см<sup>3</sup> 0,4455 н раствора азотной кислоты. Определите, что входило в состав анализируемого вещества: гидроксид калия или гидроксид натрия.

**259.** Раствор уксусной кислоты объемом 25,0 см<sup>3</sup> нейтрализовали 20,0 см<sup>3</sup> 0,1500 н раствора гидроксида калия. Вычислите молярную концентрацию и титр раствора уксусной кислоты.

**260.** Вычислите массу азотной кислоты, содержащейся в 10,0 см<sup>3</sup> раствора, если на титрование этого раствора израсходовано 12,5 см<sup>3</sup> 1,0087 н раствора гидроксида калия.

**261.** Вычислите массовую концентрацию (г/дм<sup>3</sup>) карбоната натрия в 20,0 см<sup>3</sup> раствора, если на титрование этого раствора затрачено 15,75 см<sup>3</sup> 0,1010 н раствора хлороводородной кислоты.

**262.** Вычислите массовую долю индифферентных примесей в образце технической азотной кислоты, если навеска ее, массой 1,000 г, оттитрована 25,0 см<sup>3</sup> раствора гидроксида калия с титром 0,011200 г/см<sup>3</sup>.

**263.** Навеска уксусной кислоты массой 1,0000 г растворена в мерной колбе вместимостью 200,0 см<sup>3</sup>. На титрование 20,0 см<sup>3</sup> этого раствора израсходовали 15,5 см<sup>3</sup> раствора гидроксида натрия с титром 0,004088 г/см<sup>3</sup>. Вычислите массовую долю уксусной кислоты в образце.

**264.** Рассчитайте массовую долю карбоната натрия в образце технической соды, если на нейтрализацию навески массой 0,2648 г затрачено 24,4 см<sup>3</sup> 0,0986 моль/дм<sup>3</sup> раствора серной кислоты.

**265.** В мерной колбе вместимостью 250,0 см<sup>3</sup> приготовили раствор анализируемого образца, содержащего гидроксид калия. На титрование 50,0 см<sup>3</sup> этого раствора затрачено 38,5 см<sup>3</sup> 0,0503 н раствора серной кислоты. Вычислите массу гидроксида калия.

**266.** Вычислите объем 0,1056 моль/дм<sup>3</sup> раствора гидроксида калия, который необходимо прибавить к 1,2000 г касторового масла для нейтрализации свободных жирных кислот, массовая доля которых составляет 15 %. Средняя молярная масса кислот касторового масла равна 295 г/моль.

**267.** Для определения свободных жирных кислот в мыле навеску его, массой 4,00 г, растворили в 200,0 см<sup>3</sup> этилового спирта. На титрование полученного раствора с фенолфталеином было израсходовано 3,8 см<sup>3</sup> 0,0100 моль/дм<sup>3</sup> раствора гидроксида калия. Средняя молярная масса жирных кислот в мыле составляет 282 г/моль. Рассчитайте массовую долю свободных кислот в мыле.

**268.** Вычислите массовую долю оксида натрия в образце, если на титрование образца массой 0,1545 г было израсходовано 15,25 см<sup>3</sup> 0,1010 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты.

**269.** Содержание муравьиной кислоты в формалине, используемом для дезинфекции технологического оборудования, составляет 0,025 %. Какую массу навески препарата следует взять для анализа, чтобы на титрование расходовалось 4,5 см<sup>3</sup> 0,0250 моль/дм<sup>3</sup> раствора гидроксида натрия.

**270.** Рассчитайте массовую долю буры ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) в техническом препарате, если на титрование навески массой 0,8750 г расходуется 20,4 см<sup>3</sup> 0,2120 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты.

**271.** На титрование навески концентрированной хлороводородной кислоты массой 3,204 г расходуется 33,0 см<sup>3</sup> 1,0100 н раствора гидроксида натрия. Рассчитайте процентное содержание кислоты и установите, удовлетворяет ли оно стандарту, предусматривающему содержание хлороводородной кислоты в пределах 35–38 %.

**272.** Для нейтрализации 1,10 г исследуемого вещества потребовалось 31,4 см<sup>3</sup> 0,8600 н раствора хлороводородной кислоты. Установите, какое это вещество (гидроксид натрия или гидроксид калия) и рассчитайте массовую долю примесей в препарате.

**273.** Вычислите массу навески негашеной извести, содержащей 90 % оксида кальция и индифферентные примеси, которую требуется взять для анализа, чтобы на ее нейтрализацию расходовалось 20,0 см<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты с титром 0,007300 г/мл.

**274.** Массовая доля уксусной кислоты в столовом уксусе составляет 6,5 %. Рассчитайте объем 0,1050 моль/дм<sup>3</sup> раствора гидроксида натрия, который расходуется на титрование 10,0 см<sup>3</sup> разбавленного в 10 раз столового уксуса плотностью 1,0 г/см<sup>3</sup>.

**275.** На титрование раствора, содержащего 0,1500 г монокарбоновой кислоты, израсходовано 10,5 см<sup>3</sup> 0,0500 моль/дм<sup>3</sup> раствора гидроксида калия. Вычислите молярную массу эквивалента кислоты.

**276.** Навеску 0,1254 г технической соды, содержащей 87,57 % карбоната натрия, обработали 25,0 см<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты. Избыток кислоты оттитровали 25,4 см<sup>3</sup> раствора гидроксида натрия с титром 0,004800 г/см<sup>3</sup>. Вычислите нормальную концентрацию раствора кислоты.

**277.** Навеску технического карбоната кальция массой 0,2126 г растворили в 25,0 см<sup>3</sup> 0,2950 н раствора азотной кислоты. На титрование избытка кислоты затратили 14,1 см<sup>3</sup> 0,3300 н раствора гидроксида натрия. Вычислите массовую долю примесей в образце.

**278.** Через 25,0 см<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты с титром 0,006970 г/см<sup>3</sup> пропущен газ, содержащий аммиак. На титрование остатка кислоты израсходовано 7,25 см<sup>3</sup> раствора гидроксида натрия. Предварительно определяли концентрацию раствора гидроксида натрия, причем установили, что 10,0 см<sup>3</sup> раствора щелочи эквивалентны 10,2 см<sup>3</sup> раствора кислоты. Рассчитайте массу поглощенного аммиака.

**279.** Навеску мрамора массой 0,2834 г растворили в 30,0 см<sup>3</sup> 0,3933 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты. На титрование избытка кислоты израсходовано 14,1 см<sup>3</sup> 0,4400 моль/дм<sup>3</sup> раст-

вора гидроксида натрия. Рассчитайте массовую долю примесей в образце.

**280.** Навеска 0,1617 г нитрата аммония обработана при кипячении 20,0 см<sup>3</sup> 0,1615 моль/дм<sup>3</sup> раствора гидроксида натрия. После охлаждения на титрование избытка щелочи было израсходовано 22,55 см<sup>3</sup> 0,0546 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты. Рассчитайте массовую долю аммиака в навеске.

**281.** К навеске минерала стронцианита массой 0,4789 г добавили 40,0 см<sup>3</sup> 0,5100 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты. Избыток кислоты оттитровали 20,0 см<sup>3</sup> раствора гидроксида натрия с титром 0,027820 г/см<sup>3</sup>. Вычислите массовую долю оксида стронция в минерале.

**282.** Навеску 1,2850 г технического карбоната натрия растворили в воде в мерной колбе вместимостью 250,0 см<sup>3</sup>. К 25,0 см<sup>3</sup> приготовленного раствора добавили 25,0 см<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты с титром 0,007416 г/см<sup>3</sup>, избыток которой оттитровывали 23,4 см<sup>3</sup> 0,1256 н раствора гидроксида натрия. Рассчитайте массовую долю примесей в соде.

**283.** Пробу массой 1,2100 г, содержащую нитрат аммония, растворили и разбавили до 200,0 см<sup>3</sup> водой. К 50,0 см<sup>3</sup> раствора прибавили щелочь, выделившийся аммиак отогнали в колбу, содержащую 30,0 см<sup>3</sup> 0,0842 н раствора хлороводородной кислоты. На титрование избытка кислоты израсходовали 10,1 см<sup>3</sup> 0,0880 н гидроксида натрия. Рассчитайте массовую долю нитрата аммония в пробе.

**284.** К навеске 0,7500 г  $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , растворенной в воде, добавили 25,0 см<sup>3</sup> раствора гидроксида калия. Избыток последнего оттитровывали 4,05 см<sup>3</sup> 0,1250 н раствора хлороводородной кислоты. Рассчитайте молярную концентрацию раствора щелочи.

**285.** Вычислите массу малинового шпата, содержащего 61,7 % оксида марганца (II), которую необходимо взять для анализа, чтобы после добавления к ней 20,0 см<sup>3</sup> 0,1048 н раствора хлороводородной кислоты, на титрование избытка кислоты было израсходовано 5,25 см<sup>3</sup> раствора гидроксида калия с титром 0,005367 г/см<sup>3</sup>.

**286.** Навеску 6,0000 г препарата, содержащего ZnO, растворили в 50,0 см<sup>3</sup> 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты. Избыток кислоты оттитровывали 7,5 см<sup>3</sup> 0,1015 моль/дм<sup>3</sup> раствора

гидроксида натрия. Рассчитайте массовую долю оксида цинка в препарате.

**287.** Вычислите массу навески нашатыря  $\text{NH}_4\text{Cl}$  с массовой долей аммиака 30 %, если после добавления к ней  $50,0 \text{ см}^3$   $0,1000 \text{ моль/дм}^3$  раствора гидроксида натрия и нагревания до полного удаления аммиака избыток гидроксида натрия оттитрован  $25,0 \text{ см}^3$   $0,1000 \text{ моль/дм}^3$  раствора хлороводородной кислоты.

**288.** Навеску технической соды массой  $0,1232 \text{ г}$  обработали  $50,0 \text{ см}^3$   $0,0949 \text{ н}$  раствора хлороводородной кислоты, избыток кислоты оттитровали  $24,8 \text{ см}^3$  раствора гидроксида натрия. Вычислите массовую долю индифферентных примесей в образце, если  $10,0 \text{ см}^3$  раствора щелочи эквивалентны  $10,5 \text{ см}^3$  кислоты.

**289.** К навеске  $0,2815 \text{ г}$  известняка, содержащего карбонат кальция и индифферентные примеси, добавили  $20,0 \text{ см}^3$   $0,1175 \text{ н}$  раствора хлороводородной кислоты. На титрование избытка кислоты затратили  $5,0 \text{ см}^3$   $0,1205 \text{ н}$  раствора гидроксида натрия. Определите массовую долю  $\text{CaCO}_3$  в образце.

**290.** К навеске  $1,8219 \text{ г}$  церуссита, содержащего 83,5 % оксида свинца (II), добавили  $25,0 \text{ см}^3$   $0,9787 \text{ моль/дм}^3$  раствора азотной кислоты. На титрование избытка кислоты израсходовали  $12,85 \text{ см}^3$  раствора гидроксида калия. Вычислите титр раствора титранта.

**291.** Навеску сульфата аммония растворили в мерной колбе вместимостью  $100,0 \text{ см}^3$ . К  $20,0 \text{ см}^3$  полученного раствора прибавили  $50,0 \text{ см}^3$   $0,1122 \text{ моль/дм}^3$  раствора гидроксида натрия и нагрели до полного удаления аммиака. Избыток щелочи оттитровали  $18,0 \text{ см}^3$   $0,1068 \text{ моль/дм}^3$  раствора хлороводородной кислоты. Вычислите массу сульфата аммония.

**292.** Навеску  $0,5000 \text{ г}$  нахколита, содержащего гидрокарбонат натрия, растворили в воде в мерной колбе вместимостью  $250,0 \text{ см}^3$ . К  $100,0 \text{ см}^3$  полученного раствора добавили  $50,0 \text{ см}^3$  раствора хлороводородной кислоты с титром  $0,003646 \text{ г/см}^3$ . После удаления углекислого газа на титрование избытка кислоты израсходовано  $19,6 \text{ см}^3$   $0,1351 \text{ н}$  раствора гидроксида калия. Вычислите массовую долю примесей в минерале.

**293.** Навеску азотной кислоты массой  $1,0100 \text{ г}$  перенесли в раствор, содержащий  $25,0 \text{ см}^3$   $0,5020 \text{ моль/дм}^3$  раствора гидроксида

натрия. Оставшийся после реакции избыток щелочи оттитровали  $10,5 \text{ см}^3$   $0,1010 \text{ моль/дм}^3$  раствора хлороводородной кислоты. Вычислите массовую долю азотной кислоты.

**294.** Навеску  $0,2532 \text{ г}$  технической соды, содержащей  $27,79 \%$  индифферентных примесей, обработали  $25,0 \text{ см}^3$   $0,1874 \text{ н}$  раствора хлороводородной кислоты, избыток кислоты оттитровали раствором гидроксида натрия с титром  $0,003860 \text{ г/см}^3$ . Вычислите объем титранта, израсходованного на титрование.

**295.** Навеску природного минерала, содержащего  $77,7 \%$  оксида бария, растворили в воде в мерной колбе вместимостью  $200,0 \text{ см}^3$ . К  $50,0 \text{ см}^3$  полученного раствора добавили  $20,0 \text{ см}^3$   $0,1125 \text{ н}$  раствора азотной кислоты, на титрование избытка которой затратили  $4,5 \text{ см}^3$  раствора гидроксида калия. При стандартизации раствора щелочи было установлено, что  $5,0 \text{ см}^3$  ее раствора эквивалентны  $4,2 \text{ см}^3$  раствора азотной кислоты. Рассчитайте массу минерала, взятую для анализа.

**296.** Навеску соли аммония массой  $1,000 \text{ г}$  обработали избытком концентрированного раствора гидроксида натрия. Выделившийся аммиак поглотили  $50,0 \text{ см}^3$   $1,0720 \text{ моль/дм}^3$  раствора хлороводородной кислоты и избыток кислоты оттитровали  $25,4 \text{ см}^3$  раствора  $\text{NaOH}$  с титром  $0,041200 \text{ г/см}^3$ . Вычислите массовую долю аммиака в образце.

**297.** К навеске сульфита калия массой  $0,1056 \text{ г}$  добавили  $25,0 \text{ см}^3$   $0,0400 \text{ моль/дм}^3$  раствора серной кислоты, на титрование избытка которой после удаления оксида серы (IV) затратили  $6,4 \text{ см}^3$  раствора гидроксида калия. Вычислите нормальную концентрацию титранта.

**298.** Вычислите объем хлороводородной кислоты с титром  $0,003638 \text{ г/см}^3$ , в котором нужно растворить  $0,1234 \text{ г}$  карбоната кальция, чтобы на титрование избытка кислоты было израсходовано  $19,5 \text{ см}^3$   $0,1039 \text{ н}$  раствора гидроксида натрия.

**299.** К раствору, содержащему  $0,3655 \text{ г}$   $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , добавили  $40,0 \text{ см}^3$  раствора хлороводородной кислоты. Раствор прокипятили для удаления углекислого газа и на титрование избытка кислоты израсходовали  $11,25 \text{ см}^3$   $0,2732 \text{ н}$  раствора гидроксида натрия. Определите титр раствора хлороводородной кислоты.

**300.** Пробу раствора нитрата кальция обработали  $20,0 \text{ см}^3 0,0990 \text{ н}$  раствора карбоната натрия и после отделения осадка на титрование избытка карбоната натрия в присутствии метилового оранжевого было израсходовано  $7,25 \text{ см}^3 0,1010 \text{ н}$  раствора хлороводородной кислоты. Рассчитайте массу нитрата кальция в пробе.

**301.** К  $0,1500 \text{ г}$  природного минерала смитсонита, содержащего карбонат цинка, добавили  $20,0 \text{ см}^3 0,2150 \text{ моль/дм}^3$  раствора хлороводородной кислоты, после чего избыток кислоты оттитровали  $7,6 \text{ см}^3$  раствора гидроксида натрия. Рассчитайте массовую долю оксида углерода (IV) в минерале, если  $1,0 \text{ см}^3$  раствора щелочи эквивалентен  $0,983 \text{ см}^3$  раствора кислоты.

**302.** Навеску  $3,017 \text{ г}$  препарата, содержащего  $20,86 \%$  муравьиной кислоты, обработали  $50,0 \text{ см}^3 0,9022 \text{ моль/дм}^3$  раствора гидроксида натрия. Избыток щелочи оттитровали раствором хлороводородной кислоты с титром  $0,037980 \text{ г/см}^3$ . Вычислите объем кислоты, затраченный на титрование.

**303.** Вычислите объем  $0,1000 \text{ моль/дм}^3$  раствора хлороводородной кислоты, который необходимо взять для поглощения аммиака, выделяемого из  $0,5000 \text{ г}$  препарата, содержащего  $6,07 \%$  аммиака, чтобы на титрование избытка кислоты было израсходовано  $6,0 \text{ см}^3 0,1196 \text{ моль/дм}^3$  раствора гидроксида натрия.

**304.** К  $0,1938 \text{ г}$  препарата, содержащего карбонат лития, добавили  $25,0 \text{ см}^3 0,0998 \text{ моль/дм}^3$  раствора хлороводородной кислоты. Избыток кислоты оттитровали  $12,35 \text{ см}^3$  гидроксида натрия с титром по хлороводородной кислоте  $0,001991 \text{ г/см}^3$ . Вычислите массовую долю карбоната лития в пробе.

**305.** К раствору, содержащему  $0,3655 \text{ г}$  карбоната натрия, добавили  $40,0 \text{ см}^3$  раствора хлорной кислоты. Раствор прокипятили для удаления  $\text{CO}_2$  и на титрование избытка  $\text{HClO}_4$  израсходовали  $11,25 \text{ см}^3$  раствора гидроксида натрия. Определите молярные концентрации растворов хлорной кислоты и гидроксида натрия, если  $25,0 \text{ см}^3$  раствора щелочи эквивалентны  $27,4 \text{ см}^3$  кислоты.

**306.** Навеску дихромата калия массой  $0,2940 \text{ г}$  растворили в мерной колбе вместимостью  $100,0 \text{ см}^3$ . К  $25,0 \text{ см}^3$  приготовленного раствора добавили кислоту и избыток раствора йодида калия.



На титрование выделившегося йода израсходовали  $20,0 \text{ см}^3$  раствора тиосульфата натрия. Рассчитайте нормальную концентрацию и титр раствора титранта.

**307.** Вычислите объем раствора перманганата калия с титром  $0,002525 \text{ г/см}^3$ , который требуется для титрования раствора, содержащего  $0,0502 \text{ г}$  железа.

**308.** Вычислите массу препарата, содержащего  $0,3 \%$  серы, которую необходимо взять, чтобы на титрование полученного из него сероводорода потребовалось  $10,0 \text{ см}^3 0,0500 \text{ н}$  раствора йода.

**309.** К  $25,0 \text{ см}^3$  раствора сероводородной кислоты добавили  $50,0 \text{ см}^3 0,0196 \text{ н}$  раствора йода. На титрование избытка последнего было израсходовано  $11,0 \text{ см}^3 0,0204 \text{ моль/дм}^3$  раствора тиосульфата натрия. Вычислите массовую концентрацию ( $\text{г/дм}^3$ ) сероводорода в растворе.

**310.** На титрование  $0,1085 \text{ г}$  химически чистого оксалата натрия в кислой среде было затрачено  $21,25 \text{ см}^3$  раствора перманганата калия. Рассчитайте нормальную концентрацию титранта, а также его титр по железу.

**311.** Вычислите объем  $0,1000 \text{ н}$  раствора перманганата калия, который потребуется для титрования: а)  $0,1500 \text{ г}$  оксалата натрия; б) навески  $0,3000 \text{ г}$  руды, содержащей  $43 \%$  железа.

**312.** Навеска  $0,1518 \text{ г}$  сплава, содержащего железо, растворена в хлороводородной кислоте. На титрование полученного раствора израсходовано  $15,3 \text{ см}^3 0,0206 \text{ моль/дм}^3$  раствора дихромата калия. Вычислите массовую долю железа в сплаве.

**313.** На титрование  $25,0 \text{ см}^3$  раствора йода израсходовано  $22,2 \text{ см}^3 0,1313 \text{ н}$  раствора тиосульфата натрия. Рассчитайте молярную и массовую концентрации раствора йода.

**314.** Навеску образца массой  $0,1000 \text{ г}$ , содержащего  $99,98 \%$  железа, растворили в серной кислоте и оттитровали раствором перманганата калия с титром  $0,003161 \text{ г/см}^3$ . Вычислите объем титранта, израсходованный на титрование.

**315.** Навеску технического хлорида железа (III) массой  $0,3367 \text{ г}$  растворили, добавили избыток йодида калия, серную кислоту и оттитровали выделившийся йод  $22,1 \text{ см}^3 0,0923 \text{ н}$  раствора тиосульфата натрия. Вычислите массовую долю хлорида железа (III) в образце.

**316.** Рассчитайте массовую долю нитрита натрия в техническом образце, если после растворения 1,3074 г этого образца в 500,0 см<sup>3</sup> воды на титрование 50,0 см<sup>3</sup> этого раствора затрачено 35,1 см<sup>3</sup> 0,0982 н раствора перманганата калия.

**317.** Рассчитайте массу дихромата калия, чтобы на титрование йода, выделившегося в результате взаимодействия дихромата с избытком йодида калия, было израсходовано 20,0 см<sup>3</sup> раствора тиосульфата натрия с титром 0,012700 г/см<sup>3</sup>.

**318.** Навеска образца технической щавелевой кислоты массой 2,000 г растворена в 300,0 см<sup>3</sup> воды. На титрование 25,0 см<sup>3</sup> этого раствора затрачено 24,5 см<sup>3</sup> 0,1064 н раствора перманганата калия. Рассчитайте массовую долю примесей в образце.

**319.** Навеску пергидроля массой 2,5000 г растворили в мерной колбе вместимостью 500,0 см<sup>3</sup>. На титрование 25,0 см<sup>3</sup> полученного раствора пероксида водорода израсходовали 18,2 см<sup>3</sup> 0,1124 н раствора перманганата калия. Вычислите массовую долю пероксида водорода в пергидроле.

**320.** Навеску минерала сидерита массой 0,9938 г растворили в мерной колбе вместимостью 200,0 см<sup>3</sup>. На титрование 50,0 см<sup>3</sup> этого раствора затрачено 20,5 см<sup>3</sup> раствора перманганата калия с титром 0,003312 г/см<sup>3</sup>. Определите массовую долю железа в минерале.

**321.** Навеску металлической меди массой 0,1530 г растворили, прибавили избыток йодида калия и на титрование выделившегося йода израсходовали 24,2 см<sup>3</sup> раствора тиосульфата натрия. Рассчитайте нормальную концентрацию раствора титранта и его титр по меди.

**322.** Образец массой 1,6000 г, содержащий 40,3 % сульфита натрия, растворен в 250,0 см<sup>3</sup> дистиллированной воды. На титрование 20,0 см<sup>3</sup> этого раствора было израсходовано 11,6 см<sup>3</sup> раствора перманганата калия. Определите нормальную и молярную концентрации раствора титранта.

**323.** На титрование 20,0 см<sup>3</sup> раствора сульфата железа (II) в сернокислой среде израсходовали 22,5 см<sup>3</sup> 0,1000 н раствора дихромата калия. Вычислите объем воды, который необходимо добавить

к  $200,0 \text{ см}^3$  раствора сульфата железа (II), чтобы получить  $0,0500 \text{ н}$  раствор.

**324.** К навеске технического сульфита натрия массой  $0,5860 \text{ г}$  добавили  $100,0 \text{ см}^3$   $0,1000 \text{ н}$  раствора йода, избыток которого оттитровали  $42,4 \text{ см}^3$  раствора тиосульфата натрия с титром по меди  $0,006215 \text{ г/см}^3$ . Вычислите массовую долю сульфита натрия в образце.

**325.** Раствор пероксида водорода приготовили разбавлением  $25,0 \text{ см}^3$   $3 \text{ \%}$ -го раствора до  $250,0 \text{ см}^3$  водой. Рассчитайте объем приготовленного раствора, который необходимо взять, чтобы на его титрование после обработки хлороводородной кислотой и йодидом калия было израсходовано  $23,5 \text{ см}^3$   $0,1500 \text{ моль/дм}^3$  раствора тиосульфата натрия.

**326.** Навеску гематита массой  $0,5000 \text{ г}$ , содержащего  $69,96 \text{ \%}$  железа, растворили в кислоте. Полученный раствор разбавили в мерной колбе вместимостью  $250,0 \text{ см}^3$ . Вычислите объем  $0,1215 \text{ н}$  раствора перманганата калия, который потребуется для титрования  $100,0 \text{ см}^3$  полученного раствора, содержащего ионы  $\text{Fe}^{2+}$ .

**327.** После растворения навески стали массой  $1,243 \text{ г}$  хром окислили до дихромат-иона. К полученному раствору добавили  $35,0 \text{ см}^3$   $0,0461 \text{ н}$  раствора соли Мора и избыток ионов  $\text{Fe}^{2+}$  оттитровали  $16,1 \text{ см}^3$  раствора перманганата калия с титром  $0,001500 \text{ г/см}^3$ . Вычислите массовую долю хрома в стали.

**328.** Вычислите массу щавелевой кислоты, необходимую для приготовления  $500,0 \text{ см}^3$  раствора, при условии, что на титрование  $25,0 \text{ см}^3$  этого раствора расходуется  $30,25 \text{ см}^3$   $0,0985 \text{ н}$  раствора перманганата калия.

**329.** Навеску пробы Челябинского метеорита массой  $1,0000 \text{ г}$  растворили в хлороводородной кислоте. После соответствующих операций полученный раствор, содержащий железо (II), разбавили в мерной колбе вместимостью  $250,0 \text{ см}^3$ . На титрование  $25,0 \text{ см}^3$  полученного раствора  $0,0250 \text{ н}$  раствором перманганата калия затрачено  $7,6 \text{ см}^3$  титранта. Определите содержание железа в пробе Челябинского метеорита.

**330.** Вычислите молярную концентрацию раствора тиосульфата натрия, если при добавлении к  $20,0 \text{ см}^3$  раствора дихромата калия

с титром по железу  $0,005585 \text{ г/см}^3$  избытка йодида калия выделяется такое количество йода, на титрование которого расходуется  $32,5 \text{ см}^3$  раствора тиосульфата натрия.

**331.** На титрование  $0,3025 \text{ г}$  оксалата натрия израсходовано  $20,5 \text{ см}^3$  раствора перманганата калия. Вычислите титр и молярную концентрацию титранта.

**332.** Медь, содержащуюся в руде массой  $0,5100 \text{ г}$ , перевели в раствор в виде ионов  $\text{Cu}^{2+}$ . При добавлении к этому раствору йодида калия выделился йод, на титрование которого израсходовали  $14,1 \text{ см}^3$  раствора тиосульфата натрия с титром  $0,006500 \text{ г/см}^3$ . Рассчитайте массовую долю меди в руде.

**333.** На титрование  $25,0 \text{ см}^3$  раствора соли Мора  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$  с титром  $0,042590 \text{ г/см}^3$  израсходовано  $27,5 \text{ см}^3$  раствора дихромата калия. Рассчитайте нормальную концентрацию и титр раствора титранта.

**334.** Навеску стали массой  $0,2548 \text{ г}$ , содержащей  $1,09 \%$  марганца, растворили, марганец окислили до перманганат-ионов и оттитровали  $18,5 \text{ см}^3$  раствора сульфата железа (II). Вычислите нормальную концентрацию и титр раствора титранта.

**335.** Рассчитайте массовую долю железа в гематите, если на титрование  $50,0 \text{ см}^3$  раствора, полученного растворением  $1,000 \text{ г}$  навески в кислоте и разбавлением в мерной колбе вместимостью  $250,0 \text{ см}^3$ , затрачено  $20,5 \text{ см}^3$   $0,1217 \text{ н}$  раствора перманганата калия.

**336.** Вычислите массовую долю магния в алюминиевом сплаве, если после растворения  $0,5000 \text{ г}$  сплава объем раствора довели до  $100,0 \text{ см}^3$  и  $20,0 \text{ см}^3$  его оттитровали  $12,0 \text{ см}^3$   $0,0500 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III.

**337.** Для анализа отобрали  $20,0 \text{ см}^3$  сточной воды, содержащей соединения железа, окислили их до железа (III) и осадили в виде гидроксида. Промытый осадок растворили в хлороводородной кислоте и оттитровали  $4,05 \text{ см}^3$   $0,0505 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III. Вычислите массовую концентрацию ( $\text{г/дм}^3$ ) железа в сточной воде.

**338.** Рассчитайте массовую долю алюминия в сплаве, если после растворения навески сплава массой  $0,6500 \text{ г}$  и удаления мешающих компонентов объем раствора довели до  $250,0 \text{ см}^3$ , к  $20,0 \text{ см}^3$

этого раствора добавили комплексонат магния. На титрование выделившихся ионов магния потребовалось  $15,2 \text{ см}^3$   $0,0502 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III.

**339.** Навеску  $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  массой  $0,8000 \text{ г}$  растворили в воде и добавили  $50,0 \text{ см}^3$   $0,1007 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III. На титрование избытка комплексона III израсходовали  $23,0 \text{ см}^3$   $0,1178 \text{ моль/дм}^3$  раствора сульфата цинка. Вычислите массовую долю нитрата ртути (II) в образце.

**340.** Вычислите массовую долю свинца, содержащегося в сплаве, если навеску сплава массой  $2,885 \text{ г}$  растворили в мерной колбе вместимостью  $250,0 \text{ см}^3$ , а затем  $25,0 \text{ см}^3$  этого раствора оттитровали  $12,3 \text{ см}^3$   $0,1000 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III.

**341.** Навеску технического хлорида магния массой  $0,3100 \text{ г}$  растворили в мерной колбе вместимостью  $250,0 \text{ см}^3$ . На титрование  $25,0 \text{ см}^3$  этого раствора израсходовали  $10,35 \text{ см}^3$   $0,0250 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III. Рассчитайте массовую долю хлорида магния в исследуемом образце соли.

**342.** Навеска карбоната кальция массой  $0,1002 \text{ г}$  растворена в хлороводородной кислоте. После добавления аммиачного буферного раствора на титрование израсходовано  $19,9 \text{ см}^3$  раствора комплексона III. Вычислите молярную концентрацию раствора титранта.

**343.** Рассчитайте массу цинковой руды, содержащей около  $15 \%$  цинка, которую следует взять для приготовления  $100,0 \text{ см}^3$  раствора, чтобы на титрование  $20,0 \text{ см}^3$  его потребовалось  $20,0 \text{ см}^3$   $0,1065 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III.

**344.** К  $10,0 \text{ см}^3$  раствора хлорида никеля (II) добавили дистиллированную воду, аммиачный буферный раствор и  $20,0 \text{ см}^3$   $0,0180 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III. Избыток последнего оттитровали  $5,5 \text{ см}^3$   $0,0129 \text{ моль/дм}^3$  раствора хлорида магния. Рассчитайте массовую концентрацию ( $\text{г/дм}^3$ ) раствора хлорида никеля (II).

**345.** Навеска препарата  $\text{FeNH}_4(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  массой  $24,0000 \text{ г}$  растворена в воде в мерной колбе вместимостью  $1000,0 \text{ см}^3$ . На титрование  $10,0 \text{ см}^3$  приготовленного раствора израсходовано  $10,3 \text{ см}^3$  раствора комплексона III. Вычислите молярную концентрацию титранта.

**346.** Навеску образца, содержащую 84 % алюминия, растворили в мерной колбе вместимостью 200,0 см<sup>3</sup>. К 10,0 см<sup>3</sup> полученного раствора прибавили 25,0 см<sup>3</sup> 0,1020 моль/дм<sup>3</sup> раствора комплексона III, избыток которого оттитровали 9,25 см<sup>3</sup> 0,1018 моль/дм<sup>3</sup> раствора сульфата цинка. Рассчитайте массу образца.

**347.** Навеска препарата  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  массой 0,1000 г после растворения в воде оттитрована 7,3 см<sup>3</sup> 0,0500 моль/дм<sup>3</sup> раствора комплексона III. Вычислите массовую долю примесей в анализируемом препарате.

**348.** Определите массовую долю индифферентных примесей в техническом препарате ацетата свинца, если на титрование раствора, полученного из 0,1000 г его, израсходовали 11,7 см<sup>3</sup> 0,0250 моль/дм<sup>3</sup> раствора комплексона III.

**349.** К подкисленному раствору, полученному растворением 0,4505 г навески образца, содержащего основной карбонат висмута (III), добавили 20,0 см<sup>3</sup> 0,0500 моль/дм<sup>3</sup> раствора комплексона III. На титрование избытка последнего потребовалось 9,2 см<sup>3</sup> 0,0500 моль/дм<sup>3</sup> раствора сульфата цинка. Рассчитайте массовую долю висмута в анализируемом образце.

**350.** К 50,0 см<sup>3</sup> воды добавлено 25,0 см<sup>3</sup> 0,0500 моль/дм<sup>3</sup> раствора комплексона III. Избыток последнего оттитрован 20,5 см<sup>3</sup> раствора сульфата магния такой же концентрации. Вычислите общую жесткость воды.

**351.** К 20,0 см<sup>3</sup> раствора соли марганца (II) прибавили 25,0 см<sup>3</sup> 0,0101 моль/дм<sup>3</sup> раствора комплексона III. На титрование избытка последнего израсходовали 14,4 см<sup>3</sup> 0,0101 моль/дм<sup>3</sup> раствора сульфата цинка. Вычислите массовую концентрацию (г/дм<sup>3</sup>) марганца в исходном растворе.

**352.** К 25,0 см<sup>3</sup> раствора нитрата ртути (II) добавили избыток комплексоната магния. На титрование выделившихся ионов магния израсходовано 2,45 см<sup>3</sup> 0,0514 моль/дм<sup>3</sup> раствора комплексона III. Вычислите молярную и массовую концентрации раствора нитрата ртути (II).

**353.** Навеска препарата  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  массой 0,2889 г растворена в мерной колбе вместимостью 200,0 см<sup>3</sup>. На титрование 20,0 см<sup>3</sup>

полученного раствора израсходовано  $8,6 \text{ см}^3$  раствора комплексона III. Вычислите молярную концентрацию раствора титранта.

**354.** Рассчитайте массу феррита, содержащего 14 % оксида никеля (II), которую следует взять для анализа, если после растворения и соответствующей обработки на титрование никеля затрачено  $19,6 \text{ см}^3$   $0,0550 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III.

**355.** К  $20,0 \text{ см}^3$  раствора нитрата свинца (II) добавлено  $20,0 \text{ см}^3$   $0,0994 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III. На титрование избытка комплексона III затрачено  $15,25 \text{ см}^3$   $0,0200 \text{ моль/дм}^3$  раствора хлорида цинка. Рассчитайте массу нитрата свинца (II), содержащуюся в анализируемом растворе.

**356.** Навеска  $3,0340 \text{ г}$  препарата, содержащего соли железа, после соответствующей обработки количественно перенесена в мерную колбу вместимостью  $100,0 \text{ см}^3$  и разбавлена водой до метки. На титрование  $10,0 \text{ см}^3$  полученного раствора затрачено  $7,05 \text{ см}^3$   $0,0500 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III. Рассчитайте массовую долю железа в анализируемом препарате.

**357.** Навеску силиката массой  $0,2555 \text{ г}$  растворили, добавили  $25,0 \text{ см}^3$   $0,2151 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III, избыток которого оттитровали  $9,85 \text{ см}^3$   $0,1015 \text{ моль/дм}^3$  раствора сульфата цинка. Вычислите массовую долю алюминия в силикате.

**358.** Вычислите массу технического препарата нитрата кобальта (II), содержащего 7 % индифферентных примесей, которую следует взять для анализа, чтобы на титрование ее потребовалось  $10,0 \text{ см}^3$   $0,0975 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III.

**359.** Навеска пробы массой  $10,000 \text{ г}$  растворена в хлороводородной кислоте в мерной колбе вместимостью  $100,0 \text{ см}^3$ . На титрование  $25,0 \text{ см}^3$  полученного раствора израсходовано  $13,0 \text{ см}^3$   $0,5140 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III. Рассчитайте массовую долю карбоната магния в пробе.

**360.** Навеску латуни, содержащей 80 % меди, растворили в мерной колбе вместимостью  $500,0 \text{ см}^3$ . На титрование  $10,0 \text{ см}^3$  раствора израсходовали  $11,0 \text{ см}^3$   $0,0250 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III. Рассчитайте массу латуни, взятой для анализа.

**361.** Вычислите массовую долю цинка в руде, если на титрование раствора, приготовленного из ее навески массой 0,9003 г, затрачено  $19,5 \text{ см}^3$   $0,1015 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III.

**362.** К  $25,0 \text{ см}^3$  раствора соли свинца (II) добавлено  $15,0 \text{ см}^3$   $0,0200 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III, избыток которого оттитрован  $5,6 \text{ см}^3$   $0,0150 \text{ моль/дм}^3$  раствора сульфата магния. Вычислите массу свинца в  $250,0 \text{ см}^3$  раствора.

**363.** Исследуемый раствор хлорида никеля (II) разбавлен до  $250,0 \text{ см}^3$ . К  $25,0 \text{ см}^3$  этого раствора добавлено  $15,0 \text{ см}^3$   $0,0150 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III, избыток которого оттитровывали  $6,7 \text{ см}^3$   $0,0125 \text{ моль/дм}^3$  раствора сульфата магния. Рассчитайте массу никеля в исследуемом растворе.

**364.** Для титрования  $12,5 \text{ см}^3$  стандартного  $0,0100 \text{ моль/дм}^3$  раствора хлорида кальция требуется  $10,0 \text{ см}^3$  раствора комплексона III. На титрование  $25,0 \text{ см}^3$  водопроводной воды затрачено  $10,0 \text{ см}^3$  того же раствора комплексона III. Рассчитайте массовую концентрацию ( $\text{г/дм}^3$ ) кальция в анализируемой воде.

**365.** Вычислите массовую концентрацию ( $\text{г/дм}^3$ ) раствора нитрата висмута (III), если на титрование  $20,0 \text{ см}^3$  его израсходовано  $17,2 \text{ см}^3$   $0,0691 \text{ моль/дм}^3$  раствора комплексона III.

## **Построение кривых кисотно-основного титрования**

Кривая кислотно-основного титрования — это графическая зависимость изменения значения рН раствора от объема добавленного титранта  $\{\text{pH} = f(V_R)\}$ .

Для построения кривых титрования необходимо провести расчеты значений рН для различных участков кривых титрования: 1) до начала титрования; 2) до точки эквивалентности (как правило, область буферных растворов); 3) в точке эквивалентности (ТЭ); 4) после точки эквивалентности.



## Титрование сильных однопротонных кислот

Рассмотрим вычисление значений рН в моменты титрования, соответствующие различным участкам кривой титрования.

*Участок 1 — до начала титрования*

Раствор содержит только титруемую кислоту. Значение рН раствора до начала титрования рассчитывают по исходной концентрации сильной кислоты, используя формулу

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = -\lg C_{\text{к-ты}}.$$

*Участок 2 — до точки эквивалентности*

Раствор представляет собой смесь неоттитрованной кислоты и сопряженного основания. Значение рН рассчитывают по концентрации неоттитрованной сильной кислоты, поскольку сопряженное основание слишком слабо, чтобы оказать влияние на кислотно-основное равновесие, поэтому нужно воспользоваться формулами

$$[\text{H}^+] = \frac{(C \cdot V)_{\text{к-ты}} - (C \cdot V)_{\text{осн-я}}}{V_{\text{к-ты}} + V_{\text{осн-я}}},$$

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+].$$

*Участок 3 — точка эквивалентности*

При титровании сильной кислоты образуется очень слабое сопряженное основание, поэтому рН раствора в точке эквивалентности определяется ионами водорода, поступающими за счет автопротолиза растворителя — воды, и рассчитывается по величине константы автопротолиза воды:

$$[\text{H}^+] = \sqrt{k_w} = \sqrt{1 \cdot 10^{-14}} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ (моль/дм}^3\text{)},$$

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = -\lg(1 \cdot 10^{-7}) = 7.$$

*Участок 4 — после точки эквивалентности*

Раствор представляет собой смесь слабого и сильного оснований. Более сильное основание подавляет диссоциацию слабо-

го, и поэтому значение рН раствора определяется избытком добавленного титранта — сильного основания:

$$[\text{OH}^-] = \frac{(C \cdot V)_{\text{осн-я}} - (C \cdot V)_{\text{к-ты}}}{V_{\text{осн-я}} + V_{\text{к-ты}}} \quad \text{и} \quad [\text{H}^+] = \frac{k_w}{[\text{OH}^-]}$$

или

$$\text{pH} = 14 - \text{pOH}.$$

### **Титрование сильных оснований**

Рассмотрим вычисление значений рН в моменты титрования, соответствующие различным участкам кривой титрования.

*Участок 1 — до начала титрования*

Раствор содержит исходное титруемое основание. Значение рН раствора до начала титрования рассчитывают по концентрации этого сильного основания, используя формулу

$$\text{pH} = 14 + \lg[\text{OH}^-] = 14 + \lg C_{\text{осн-я}}.$$

*Участок 2 — до точки эквивалентности*

Раствор содержит смесь неоттитрованного основания и сопряженной кислоты. Значение рН рассчитывают по концентрации неоттитрованного сильного основания, поскольку сопряженная кислота очень слабая и не оказывает влияния на кислотно-основное равновесие, поэтому расчет проводят по формулам:

$$[\text{OH}^-] = \frac{(C \cdot V)_{\text{осн-я}} - (C \cdot V)_{\text{к-ты}}}{V_{\text{осн-я}} + V_{\text{к-ты}}},$$

$$\text{pH} = 14 + \lg[\text{OH}^-].$$

*Участок 3 — точка эквивалентности*

При титровании сильного основания образуется очень слабая сопряженная кислота, поэтому рН раствора определяется ионами водорода, поступающими за счет автопротолиза растворителя — воды, и рассчитывается по величине константы автопротолиза воды:

$$[\text{H}^+] = \sqrt{k_w} = \sqrt{1 \cdot 10^{-14}} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ (моль/дм}^3\text{)},$$

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] = -\lg(1 \cdot 10^{-7}) = 7.$$

*Участок 4 — после точки эквивалентности*

Раствор содержит смесь слабой и сильной кислот. Более сильная кислота подавляет ионизацию слабой, и поэтому значение pH раствора определяется избытком добавленного титранта — сильной кислоты:

$$[\text{H}^+] = \frac{(C \cdot V)_{\text{к-ты}} - (C \cdot V)_{\text{осн-я}}}{V_{\text{к-ты}} + V_{\text{осн-я}}},$$

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+].$$

### **Титрование слабых однопротонных кислот**

Рассмотрим вычисление значений pH в моменты титрования, соответствующие различным участкам кривой титрования.

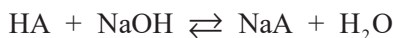
*Участок 1 — до начала титрования*

Раствор содержит только титруемую слабую кислоту. Однако при вычислении pH нужно помнить, что нельзя концентрацию ионов  $\text{H}^+$  приравнивать к общей концентрации кислоты в растворе, поскольку основная часть ее присутствует в растворе в виде неионизированных молекул и только незначительная часть ионизирует с образованием  $\text{H}^+$ -ионов. Поэтому вычисление pH проводят исходя из уравнения константы кислотной ионизации соответствующей слабой кислоты. В том случае, если степень диссоциации кислоты менее 5 %, расчет проводят по формулам

$$[\text{H}^+] = \sqrt{k_a \cdot C_{\text{HA}}} \quad \text{и} \quad \text{pH} = \frac{1}{2} \text{p}K_a - \frac{1}{2} \lg C_{\text{HA}}.$$

*Участок 2 — до точки эквивалентности*

До точки эквивалентности при титровании образуется сопряженное основание  $\text{A}^-$ :



и раствор представляет собой буферную смесь кислотного типа (смесь неоттитрованной слабой кислоты и сопряженного слабого основания). Расчет pH в этом случае следует проводить по формуле Гендерсона — Хассельбаха:

$$\begin{aligned} \text{pH} &= \text{p}K_{a, \text{HA}} - \lg \frac{C_{\text{HA}}}{C_{\text{A}^-}} = \text{p}K_{a, \text{HA}} - \lg \frac{\frac{(C \cdot V)_{\text{К-Ты}} - (C \cdot V)_{\text{осн-я}}}{V_{\text{К-Ты}} + V_{\text{осн-я}}}}{\frac{(C \cdot V)_{\text{осн-я}}}{V_{\text{К-Ты}} + V_{\text{осн-я}}}} = \\ &= \text{p}K_{a, \text{HA}} - \lg \frac{(C \cdot V)_{\text{К-Ты}} - (C \cdot V)_{\text{осн-я}}}{(C \cdot V)_{\text{осн-я}}}. \end{aligned}$$

*Участок 3 — точка эквивалентности*

В точке эквивалентности вся кислота оттитрована, раствор содержит только сопряженное слабой кислоте основание  $\text{A}^-$  с более выраженными основными свойствами, чем у растворителя. Поэтому значение pH раствора определяется концентрацией этого слабого анионного основания и рассчитывается по формуле

$$\text{pH} = 7 + \frac{1}{2} \text{p}K_a + \frac{1}{2} \lg C_{\text{соли}}.$$

Поскольку при титровании количество вещества получившегося анионного основания равно исходному количеству вещества титруемой кислоты, то

$$C_{\text{соли}} = \frac{(C \cdot V)_{\text{К-Ты}}}{V_{\text{осн-я}} + V_{\text{К-Ты}}}.$$

*Участок 4 — после точки эквивалентности*

Раствор содержит смесь слабого и сильного оснований. Более сильное основание подавляет диссоциацию слабого основания, и поэтому pH раствора определяется избытком добавленного титранта — сильного основания:

$$[\text{OH}^-] = \frac{(C \cdot V)_{\text{осн-я}} - (C \cdot V)_{\text{К-Ты}}}{V_{\text{осн-я}} + V_{\text{К-Ты}}} \quad \text{и} \quad [\text{H}^+] = \frac{k_w}{[\text{OH}^-]},$$

или

$$pH = 14 - pOH.$$

### Титрование слабых оснований

Рассмотрим вычисление значений pH в моменты титрования, соответствующие различным участкам кривой титрования.

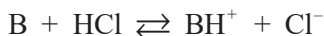
*Участок 1 — до начала титрования*

До титрования раствор содержит только титруемое слабое основание, другими источниками ионов водорода можно пренебречь. В большинстве случаев степень диссоциации слабых оснований менее 5 %, поэтому

$$[OH^-] = \sqrt{k_b \cdot C_B} \quad \text{и} \quad pH = 14 - \frac{1}{2}pK_b + \frac{1}{2}\lg C_B.$$

*Участок 2 — до точки эквивалентности*

До точки эквивалентности при титровании образуется сопряженная кислота  $BH^+$ :



и раствор представляет собой буферную систему основного типа (смесь неоттитрованного слабого основания и сопряженной слабой кислоты). Расчет значения pH в этом случае следует проводить по формуле

$$\begin{aligned} pH &= 14 - pK_{b,B} - \lg \frac{C_{BH^+}}{C_B} = 14 - pK_{b,B} - \lg \frac{\frac{(C \cdot V)_{K-ты}}{V_{осн-я} + V_{K-ты}}}{\frac{(C \cdot V)_{осн-я} - (C \cdot V)_{K-ты}}{V_{осн-я} + V_{K-ты}}} = \\ &= 14 - pK_{b,B} - \lg \frac{(C \cdot V)_{K-ты}}{(C \cdot V)_{осн-я} - (C \cdot V)_{K-ты}}. \end{aligned}$$

*Участок 3 — точка эквивалентности*

В точке эквивалентности все слабое основание оттитровано; раствор содержит только сопряженную слабому основанию кислоту  $BH^+$  с более выраженными кислотными свойствами, чем у ра-

створителя. Поэтому значение рН раствора определяется концентрацией сопряженной слабой катионной кислоты и рассчитывается по формуле

$$\text{pH} = 7 - \frac{1}{2} \text{p}K_b - \frac{1}{2} \lg C_{\text{соли}}.$$

Поскольку при титровании количество вещества получившейся катионной кислоты равно исходному количеству вещества титруемого основания, то

$$C_{\text{соли}} = \frac{(C \cdot V)_{\text{осн-я}}}{V_{\text{осн-я}} + V_{\text{к-ты}}}.$$

*Участок 4 — после точки эквивалентности*

Раствор представляет собой смесь слабой и сильной (титранта) кислот. Более сильная кислота подавляет ионизацию слабой кислоты. Величина рН раствора определяется избытком добавленного титранта — сильной кислоты:

$$[\text{H}^+] = \frac{(C \cdot V)_{\text{к-ты}} - (C \cdot V)_{\text{осн-я}}}{V_{\text{к-ты}} + V_{\text{осн-я}}} \quad \text{и} \quad \text{pH} = -\lg[\text{H}^+].$$

### **Выбор индикатора в кислотно-основном титровании**

Экспериментально конечную точку титрования (к. т. т.) устанавливают по изменению цвета индикатора. При этом существенно, чтобы изменение окраски проявлялось только при такой концентрации ионов  $\text{H}^+$ , которая соответствует точке эквивалентности. Однако очень редко удастся подобрать индикатор, окраска которого изменялась бы строго при достижении значения рН в точке эквивалентности (ТЭ). В результате возникает систематическая погрешность, поскольку титрование заканчивается либо до, либо после достижения ТЭ. Правильный выбор индикатора позволяет свести индикаторную погрешность к минимуму.

Правильно подобрать индикатор и оценить погрешность титрования позволяют кривые титрования. Индикатор выбирают так,

чтобы, во-первых, его интервал перехода окраски находился в пределах рассчитанного скачка на кривой титрования; во-вторых, значение показателя титрования ( $pT$ ) было близко к значению  $pH$  в точке эквивалентности.

Интервал перехода окраски индикатора (ИПИ) — это интервал значений  $pH$ , в котором индикатор меняет свой цвет.

В табл. 3 приведены основные характеристики наиболее часто используемых индикаторов.

Т а б л и ц а 3

**Характеристики наиболее часто используемых индикаторов**

Индикатор	ИПИ	$pT$
Метиловый оранжевый	3,2—4,4	4,0
Метиловый красный	4,2—6,2	5,5
Лакмус	5,0—8,0	7,0
Фенолфталеин	8,0—9,8	9,0

Наиболее резкое изменение цвета наблюдается, как правило, примерно в середине ИПИ. Это значение  $pH$ , при котором наблюдаем наиболее резкое изменение цвета индикатора и заканчиваем титрование, называется показателем титрования индикатора ( $pT$ ).

Поскольку величина  $pT$  соответствует одной из промежуточных окрасок индикатора, она находится внутри интервала перехода окраски индикатора. Поэтому, если величина  $pT$  не дана, можно принять, что она лежит в середине ИПИ:

$$pT = \frac{\text{ИПИ}}{2}. \quad (2.18)$$

Например, ИПИ *m*-нитрофенола составляет 6,6—8,6 единиц  $pH$ . Показатель титрования этого индикатора равен

$$pT = \frac{\text{ИПИ}}{2} = \frac{6,6 + 8,6}{2} = 7,6.$$

## Индикаторные погрешности кислотно-основного титрования

Выше было показано, что величина  $pT$  индикатора, отвечающая к. т. т., как правило, не совпадает со значением  $pH$  раствора в точке эквивалентности. Это вызывает индикаторную погрешность титрования. Вследствие несовпадения  $pT$  выбранного индикатора и  $pH$  титруемого раствора в точке эквивалентности раствор обычно либо несколько перетитровывают (титрование заканчивается после достижения ТЭ), либо, наоборот, недотитровывают (титрование заканчивается до достижения ТЭ). Погрешность титрования может быть положительной (перетитрование) и отрицательной (недотитрование).

В результате по окончании титрования раствор содержит некоторый избыток кислоты или основания. В зависимости от того, какой силы кислота или основание остается в растворе после окончания титрования, выделяют водородную ( $H^+$ ), гидроксильную ( $OH^-$ ), кислотную ( $HA$ ) и основную ( $MeOH$ ) индикаторные погрешности.

*Водородная погрешность* (или  $H^+$ -погрешность) вызвана избытком  $H^+$ -ионов в титруемом растворе, когда значение  $pT$  меньше, чем  $pH$  в точке эквивалентности:  $pT < pH_{ТЭ}$ . Она возникает в двух случаях: а) при недотитровании сильной кислоты сильным основанием; б) при перетитровании сильного или слабого основания сильной кислотой.

*Гидроксильная погрешность* (или  $OH^-$ -погрешность) вызвана избытком  $OH^-$ -ионов в титруемом растворе, когда  $pT > pH_{ТЭ}$ . Возникает в двух случаях: а) при перетитровании сильной или слабой кислоты сильным основанием; б) при недотитровании сильного основания сильной кислотой.

*Кислотная погрешность* (или  $HA$ -погрешность) вызвана присутствием слабой кислоты в растворе после окончания титрования. Возникает в случае недотитрования слабой кислоты сильным основанием,  $pT < pH_{ТЭ}$ .

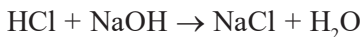
*Основная погрешность* (или  $MeOH$ -погрешность) вызвана присутствием в растворе после окончания титрования слабого основания. Возникает в единственном случае: при недотитровании слабого основания сильной кислотой. При этом  $pT > pH_{ТЭ}$ .



## РЕШЕНИЕ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

**Пр и м е р 1.** Постройте кривую титрования 100,0 см<sup>3</sup> 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствором гидроксида натрия. Выберите индикатор для фиксирования конечной точки титрования и определите тип и знак индикаторной погрешности.

**Р е ш е н и е.** Взаимодействие хлороводородной кислоты с гидроксидом натрия описывается уравнением реакции



Объем гидроксида натрия, при добавлении которого будет достигнута точка эквивалентности, рассчитываем по закону эквивалентов (2.8):

$$V_{\text{NaOH}} = \frac{(C \cdot V)_{\text{HCl}}}{C_{\text{NaOH}}} = \frac{0,1 \cdot 100,0}{0,1} = 100,0 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Поскольку титруемое вещество — хлороводородная кислота — является сильной кислотой, то расчеты проводят по формулам, представленным выше, в подразделе «Титрование сильных однопротонных кислот». Результаты вычислений приведены в табл. 4, по данным которой строят интегральную кривую титрования (рис. 1).

Т а б л и ц а 4

**Значения рН при титровании  
100,0 см<sup>3</sup> 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствора хлороводородной кислоты  
0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствором гидроксида натрия**

$V_{\text{NaOH}}$ см <sup>3</sup>	Состав раствора	рН-определяющий компонент	Расчет $[\text{H}^+]$	рН
0	HCl	HCl	$[\text{H}^+] = 0,1000 \text{ моль/дм}^3$	1
10	HCl, NaCl, H <sub>2</sub> O	—”—	$[\text{H}^+] = \frac{0,1 \cdot 100 - 0,1 \cdot 10}{100 + 10} = 0,082$	1,09
50	—”—	—”—	$[\text{H}^+] = \frac{0,1 \cdot 100 - 0,1 \cdot 50}{100 + 50} = 0,033$	1,48

Окончание табл. 4

$V_{\text{NaOH}}, \text{ см}^3$	Состав раствора	pH-определяющий компонент	Расчет $[\text{H}^+]$	pH
90	—”—	—”—	$[\text{H}^+] = \frac{0,1 \cdot 100 - 0,1 \cdot 90}{100 + 90} = 5,3 \cdot 10^{-3}$	2,28
99	—”—	—”—	$[\text{H}^+] = \frac{0,1 \cdot 100 - 0,1 \cdot 99}{100 + 99} = 5 \cdot 10^{-4}$	3,30
99,9	—”—	—”—	$[\text{H}^+] = \frac{0,1 \cdot 100 - 0,1 \cdot 99,9}{100 + 99,9} = 5 \cdot 10^{-5}$	4,30
100,0	NaCl, H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	$[\text{H}^+] = \sqrt{1 \cdot 10^{-14}} = 1 \cdot 10^{-7}$	7
100,1	NaOH, NaCl, H <sub>2</sub> O	NaOH	$[\text{OH}^-] = \frac{0,1 \cdot 100,1 - 0,1 \cdot 100}{100,1 + 100} =$ $= 5 \cdot 10^{-5};$ $[\text{H}^+] = \frac{1 \cdot 10^{-14}}{5 \cdot 10^{-5}} = 2 \cdot 10^{-10}$	9,70
101	—”—	—”—	$[\text{OH}^-] = \frac{0,1 \cdot 101 - 0,1 \cdot 100}{101 + 100} =$ $= 4,98 \cdot 10^{-4};$ $[\text{H}^+] = \frac{1 \cdot 10^{-14}}{4,98 \cdot 10^{-4}} = 2 \cdot 10^{-11}$	10,70
110	—”—	—”—	$[\text{OH}^-] = \frac{0,1 \cdot 110 - 0,1 \cdot 100}{110 + 100} =$ $= 4,76 \cdot 10^{-3};$ $[\text{H}^+] = \frac{1 \cdot 10^{-14}}{4,76 \cdot 10^{-3}} = 2,1 \cdot 10^{-12}$	11,68

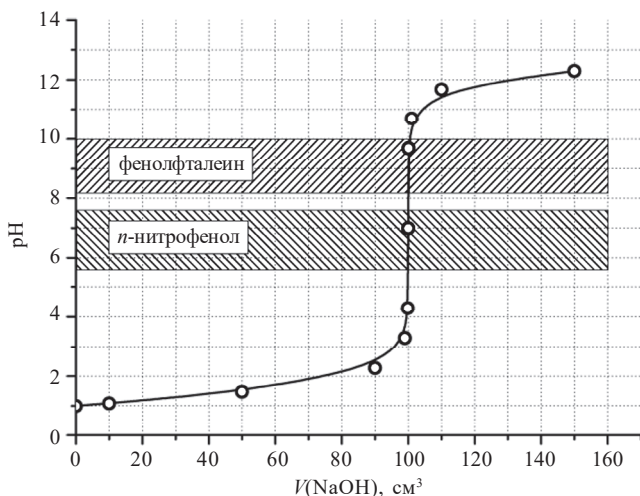


Рис. 1. Кривая титрования  $100,0 \text{ см}^3 0,1000 \text{ моль/дм}^3$  раствора хлороводородной кислоты  $0,1000 \text{ моль/дм}^3$  раствором гидроксида натрия

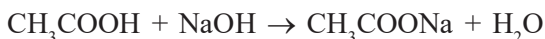
Для фиксирования к. т. т. можно использовать *n*-нитрофенол, ИПИ (5,6—7,6) которого попадает на скачок кривой титрования (см. рис. 1). Значение  $pT$  этого индикатора равно 6,6, что меньше значения  $pH$  в точке эквивалентности. Титрование заканчивается до достижения ТЭ, следовательно, раствор, кроме продуктов реакции ( $\text{NaCl}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ), содержит некоторое количество титруемого вещества ( $\text{HCl}$ ). При использовании *n*-нитрофенола для фиксирования точки эквивалентности возникает водородная ( $\text{H}^+$ ) погрешность, так как хлороводородная кислота — это сильная молекулярная кислота. Знак погрешности «←».

Фенолфталеин (ИПИ 8,2—10,  $pT$  9) также может быть применен для фиксирования ТЭ. Титрование заканчивается после достижения ТЭ, так как  $pT > pH_{\text{ТЭ}}$ , следовательно, в растворе, кроме продуктов реакции, содержится некоторое избыточное количество титранта  $\text{NaOH}$  — сильного молекулярного основания. Поэтому при использовании фенолфталеина возникает положительная гидроксильная ( $\text{OH}^-$ ) погрешность.

Поскольку значение  $pT$   $n$ -нитрофенола более близко к значению  $pH_{TЭ}$ , чем для фенолфталеина, численное значение индикаторной погрешности будет меньше при его использовании.

**Пример 2.** Постройте кривую титрования 100,0 см<sup>3</sup> 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствора уксусной кислоты 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствором гидроксида натрия. Выберите индикатор для фиксирования к. т. т. и определите тип и знак индикаторной погрешности.

**Решение.** Взаимодействие уксусной кислоты с гидроксидом натрия соответствует уравнению реакции



Объем гидроксида натрия, при добавлении которого будет достигнута ТЭ, рассчитываем по закону эквивалентов:

$$V_{\text{NaOH}} = \frac{(C \cdot V)_{\text{HCl}}}{C_{\text{NaOH}}} = \frac{0,1 \cdot 100,0}{0,1} = 100,0 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Поскольку титруемое вещество – уксусная кислота – является слабой молекулярной однопротонной кислотой, то расчеты проводят по формулам, представленным выше, в подразделе «Титрование слабых однопротонных кислот». Результаты вычислений приведены в табл. 5, по данным которой строят интегральную кривую титрования (рис. 2).

Т а б л и ц а 5

**Значения pH при титровании  
100,0 см<sup>3</sup> 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствора уксусной кислоты  
0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствором гидроксида натрия**

$V_{\text{NaOH}}$ , см <sup>3</sup>	Состав раствора	pH-определяющий компонент	Расчет $[\text{H}^+]$	pH
0	CH <sub>3</sub> COOH	CH <sub>3</sub> COOH	$\text{pH} = \frac{1}{2} \cdot 4,76 - \frac{1}{2} \lg 0,1 =$ $= 2,38 - (-0,5)$	2,88

Продолжение табл. 5

$V_{\text{NaOH}},$ см <sup>3</sup>	Состав раствора	pH-определяющий компонент	Расчет $[\text{H}^+]$	pH
10	$\text{CH}_3\text{COOH},$ $\text{CH}_3\text{COONa},$ $\text{H}_2\text{O}$	$\text{CH}_3\text{COOH},$ $\text{CH}_3\text{COONa}$	$\text{pH} = 4,76 - \lg \frac{0,1 \cdot 100 - 0,1 \cdot 10}{0,1 \cdot 10} =$ $= 4,76 - 0,95$	3,81
50	—”—	—”—	$\text{pH} = 4,76 - \lg \frac{0,1 \cdot 100 - 0,1 \cdot 50}{0,1 \cdot 50} =$ $= 4,76 - 0$	4,76
90	—”—	—”—	$\text{pH} = 4,76 - \lg \frac{0,1 \cdot 100 - 0,1 \cdot 90}{0,1 \cdot 90} =$ $= 4,76 - (-0,95)$	5,71
99	—”—	—”—	$\text{pH} = 4,76 - \lg \frac{0,1 \cdot 100 - 0,1 \cdot 99}{0,1 \cdot 99} =$ $= 4,76 - (-2,00)$	6,76
99,9	—”—	—”—	$\text{pH} = 4,76 - \lg \frac{0,1 \cdot 100 - 0,1 \cdot 99,9}{0,1 \cdot 99,9} =$ $= 4,76 - (-3,00)$	7,76
100,0	$\text{CH}_3\text{COONa},$ $\text{H}_2\text{O}$	$\text{CH}_3\text{COONa}$	$C_{\text{CH}_3\text{COONa}} = \frac{0,1 \cdot 100}{100 + 100} = 0,05;$  $\text{pH} = 7 + \frac{1}{2} \cdot 4,76 + \frac{1}{2} \lg 0,05 =$ $= 7 + 2,38 + (-0,65)$	8,73
100,1	$\text{NaOH},$ $\text{CH}_3\text{COONa},$ $\text{H}_2\text{O}$	$\text{NaOH}$	$[\text{OH}^-] = \frac{0,1 \cdot 100,1 - 0,1 \cdot 100}{100,1 + 100} =$ $= 5 \cdot 10^{-5};$  $[\text{H}^+] = \frac{1 \cdot 10^{-14}}{5 \cdot 10^{-5}} = 2 \cdot 10^{-10}$	9,70

$V_{\text{NaOH}}$ см <sup>3</sup>	Состав раствора	pH-определяющий компонент	Расчет $[\text{H}^+]$	pH
101	—”—	—”—	$[\text{OH}^-] = \frac{0,1 \cdot 101 - 0,1 \cdot 100}{101 + 100} =$ $= 4,98 \cdot 10^{-4};$ $[\text{H}^+] = \frac{1 \cdot 10^{-14}}{4,98 \cdot 10^{-4}} = 2 \cdot 10^{-11}$	10,70
110	—”—	—”—	$[\text{OH}^-] = \frac{0,1 \cdot 110 - 0,1 \cdot 100}{110 + 100} =$ $= 4,76 \cdot 10^{-3};$ $[\text{H}^+] = \frac{1 \cdot 10^{-14}}{4,76 \cdot 10^{-3}} = 2,1 \cdot 10^{-12}$	11,68
150	—”—	—”—	$[\text{OH}^-] = \frac{0,1 \cdot 150 - 0,1 \cdot 100}{150 + 100} =$ $= 0,02;$ $[\text{H}^+] = \frac{1 \cdot 10^{-14}}{0,02} = 5 \cdot 10^{-13}$	12,30

При титровании уксусной кислоты можно использовать, например, фенолфталеин и хинолиновый синий, так как их  $pT$  9 и 7,5 соответственно, лежат в пределах скачка титрования (см. рис. 2). Изменение окраски бромфенолового синего, отвечающее значению pH 3,8, наблюдается в тот момент, когда оттитровано незначительное от общего количество уксусной кислоты (см. рис. 2). Поэтому применение этого индикатора при титровании уксусной кислоты неприемлемо.

При использовании фенолфталеина возникает гидроксильная ( $\text{OH}^-$ ) погрешность, так как его  $pT$  больше, чем значение  $pH_{\text{тэ}}$ , в растворе после окончания титрования присутствует избы-

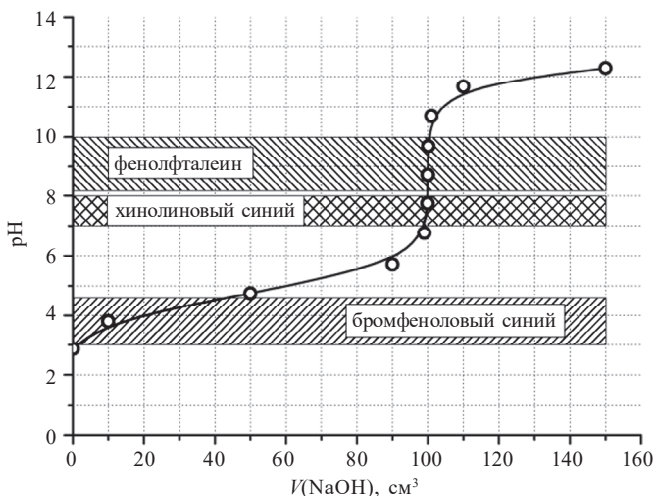


Рис. 2. Кривая титрования  $100,0 \text{ см}^3 0,1000 \text{ моль/дм}^3$  раствора уксусной кислоты  $0,1000 \text{ моль/дм}^3$  раствором гидроксида натрия

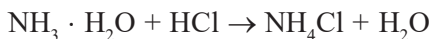
точное количество титранта NaOH — сильного молекулярного основания. Знак погрешности «+».

Кислотная (НА) погрешность возникает при титровании уксусной кислоты в присутствии хинолинового синего, поскольку  $pT < pN_{T3}$ , и после изменения окраски индикатора в растворе будет присутствовать некоторое количество неоттитрованной слабой молекулярной кислоты  $\text{CH}_3\text{COOH}$ . Знак погрешности «-».

Индикаторная погрешность определения уксусной кислоты методом кислотно-основного титрования будет наименьшей при использовании фенолфталеина, поскольку его значение  $pT$  более близко к значению  $pN_{T3}$ , чем у хинолинового синего.

**Пример 3.** Постройте кривую титрования  $50,0 \text{ см}^3 0,1000 \text{ моль/дм}^3$  раствора аммиака  $0,1000 \text{ моль/дм}^3$  раствором хлороводородной кислоты. Выберите индикатор для фиксирования конечной точки титрования и определите тип индикаторной погрешности.

**Р е ш е н и е.** Взаимодействие аммиака с хлороводородной кислотой осуществляется по уравнению реакции



Объем хлороводородной кислоты, при добавлении которого будет достигнута ТЭ, рассчитываем по закону эквивалентов:

$$V_{\text{HCl}} = \frac{(C \cdot V)_{\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}}{C_{\text{HCl}}} = \frac{0,1 \cdot 50,0}{0,1} = 50,0 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Поскольку титруемое вещество — водный раствор аммиака — является слабым молекулярным основанием, то расчеты проводят по формулам, представленным в подразделе «Титрование слабых оснований». Результаты вычислений приведены в табл. 6, по данным которой строят интегральную кривую титрования (рис. 3).

Т а б л и ц а 6

**Значения pH при титровании  
50,0 см<sup>3</sup> 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствора аммиака  
0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствором хлороводородной кислоты**

$V_{\text{HCl}}$ , см <sup>3</sup>	Состав раствора	pH-опреде- ляющий компонент	Расчет $[\text{H}^+]$	pH
0	$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{pH} = 14 - \frac{1}{2} \cdot 4,755 + \frac{1}{2} \lg 0,1 =$ $= 14 - 2,38 + (-0,5)$	11,12
10	$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O},$ $\text{NH}_4\text{Cl},$ $\text{H}_2\text{O}$	$\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O},$ $\text{NH}_4\text{Cl}$	$\text{pH} = 14 - 4,755 - \lg \frac{0,1 \cdot 10}{0,1 \cdot 50 - 0,1 \cdot 10} =$ $= 14 - 4,755 - (-0,60)$	9,85
40	—”—	—”—	$\text{pH} = 14 - 4,755 - \lg \frac{0,1 \cdot 40}{0,1 \cdot 50 - 0,1 \cdot 40} =$ $= 14 - 4,755 - 0,60$	8,64
49	—”—	—”—	$\text{pH} = 14 - 4,755 - \lg \frac{0,1 \cdot 49}{0,1 \cdot 50 - 0,1 \cdot 49} =$ $= 14 - 4,755 - 1,69$	7,55



О к о н ч а н и е   т а б л .   6

$V_{\text{HCl}},$ см <sup>3</sup>	Состав раствора	pH-опреде- ляющий компонент	Расчет $[\text{H}^+]$	pH
49,9	—”—	—”—	$\text{pH} = 14 - 4,755 - \lg \frac{0,1 \cdot 49,9}{0,1 \cdot 50 - 0,1 \cdot 49,9} =$ $= 14 - 4,755 - 2,70$	6,55
50,0	$\text{NH}_4\text{Cl},$ $\text{H}_2\text{O}$	$\text{NH}_4\text{Cl}$	$\tilde{n}_{\text{NH}_4\text{Cl}} = \frac{0,1 \cdot 50}{100} = 0,05;$ $\text{pH} = 7 - \frac{1}{2} \cdot 4,755 - \frac{1}{2} \lg 0,05 =$ $= 7 - 2,38 - (-0,65)$	5,27
50,1	$\text{HCl},$ $\text{NH}_4\text{Cl},$ $\text{H}_2\text{O}$	$\text{HCl}$	$[\text{H}^+] = \frac{0,1 \cdot 50,1 - 0,1 \cdot 50}{50,1 + 50} =$ $= 9,99 \cdot 10^{-5}$	4,00
51	—”—	—”—	$[\text{H}^+] = \frac{0,1 \cdot 51 - 0,1 \cdot 50}{51 + 50} =$ $= 9,90 \cdot 10^{-4}$	3,00
60	—”—	—”—	$[\text{H}^+] = \frac{0,1 \cdot 60 - 0,1 \cdot 50}{60 + 50} =$ $= 9,10 \cdot 10^{-3}$	2,04

Фенолфталеин не может быть использован для фиксирования к. т. т. водного раствора аммиака раствором хлороводородной кислоты, так как его ИПИ (8,2—10) не находится в пределах скачка титрования (см. рис. 3). Для этой цели может быть использован метиловый красный (ИПИ 4,2—6,2), индикаторная погрешность — основная (MeOH), т. к.  $\text{p}T > \text{pH}_{\text{ТЭ}}$ , в растворе после окончания титрования присутствует избыточное количество титруемого вещества — слабого основания.

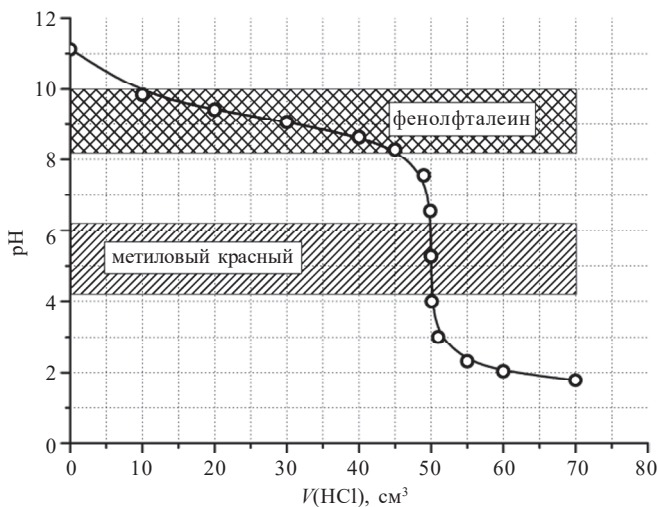


Рис. 3. Кривая титрования 50,0 см<sup>3</sup> 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствора аммиака 0,1000 моль/дм<sup>3</sup> раствором хлороводородной кислоты

### КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

**366–415.** Постройте кривую титрования раствора вещества X раствором титранта R. Выберите индикатор для фиксирования конечной точки титрования и определите знак и тип индикаторной погрешности.

№ п/п	Титруемое вещество X	Титрант R
366.	Азотистая кислота: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
367.	Акриловая кислота: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
368.	Гидроксид калия: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Азотная кислота, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор

Продолжение таблицы

№ п/п	Титруемое вещество X	Титрант R
369.	Антралиловая кислота: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,2 моль/дм <sup>3</sup> раствор
370.	Бензойная кислота: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
371.	Метиламин: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,2 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Бромоводородная кислота, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
372.	Валериановая (норм.) кислота: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствор
373.	Галловая кислота: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствор
374.	Хлороводородная кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,2 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
375.	Бензиламин: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Хлороводородная кислота, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
376.	о-Нитробензойная кислота: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,2 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,2 моль/дм <sup>3</sup> раствор
377.	Дихлоруксусная кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствор
378.	Диэтиламин: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Азотная кислота, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор

Продолжение таблицы

№ п/п	Титруемое вещество X	Титрант R
379.	Масляная (норм.) кислота: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
380.	Муравьиная кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
381.	Циклогексиламин: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Бромоводородная кислота, 0,2 моль/дм <sup>3</sup> раствор
382.	Азотная кислота: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,2 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
383.	Гликолевая кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствор
384.	Гидроксид калия: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,025 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Бромоводородная кислота, 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствор
385.	Каприловая кислота: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствор
386.	Лауриновая кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
387.	Триметиламин: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Хлороводородная кислота, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
388.	м-Нитробензойная кислота: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор

Продолжение таблицы

№ п/п	Титруемое вещество X	Титрант R
389.	Бромоводородная кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
390.	Пропионовая кислота: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,025 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,025 моль/дм <sup>3</sup> раствор
391.	Этаноламин: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Бромоводородная кислота, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
392.	Молочная кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,025 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствор
393.	Кротоновая кислота: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
394.	Гидроксид натрия: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Азотная кислота, 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствор
395.	Фтороводородная кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,025 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствор
396.	Глюконовая кислота: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,2 моль/дм <sup>3</sup> раствор
397.	Хлоруксусная кислота: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствор
398.	Йодоводородная кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,2 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор

Продолжение таблицы

№ п/п	Титруемое вещество X	Титрант R
399.	Этиламин: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Азотная кислота, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
400.	Глицериновая кислота: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
401.	Капроновая кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,025 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,025 моль/дм <sup>3</sup> раствор
402.	Миндальная кислота: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
403.	Диизопропиламин: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Хлороводородная кислота, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
404.	Сульфаниловая кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,025 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствор
405.	Масляная (изо) кислота: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
406.	Хлористая кислота: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,2 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,2 моль/дм <sup>3</sup> раствор
407.	Бутиламин: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Бромоводородная кислота, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
408.	Валериановая (изо) кислота: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор

О к о н ч а н и е   т а б л и ц ы

№ п/п	Титруемое вещество X	Титрант R
409.	Азотная кислота: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
410.	Циановая кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,025 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствор
411.	<i>n</i> -Нитробензойная кислота: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
412.	Триэтиламин: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,2 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Азотная кислота, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
413.	Йодоводородная кислота: а) 50,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 25,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид натрия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
414.	Энантовая кислота: а) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 50,0 см <sup>3</sup> 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Гидроксид калия, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор
415.	Диметиламин: а) 25,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора; б) 100,0 см <sup>3</sup> 0,05 моль/дм <sup>3</sup> раствора	Хлороводородная кислота, 0,1 моль/дм <sup>3</sup> раствор

### 3. ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА

*Гравиметрическим* называют метод количественного химического анализа, основанный на точном измерении массы определяемого компонента пробы, выделенного в виде малорастворимого соединения определенного состава.

В методах осаждения навеску анализируемого вещества тем или иным способом переводят в раствор, после чего определяемый элемент (X) осаждают осадителем (R) в виде какого-либо малорастворимого соединения (или выделяют в элементарном виде), называемого *осаждаемой формой*:



Выпавший осадок отделяют фильтрованием, тщательно промывают, прокаливают или высушивают, и в результате такой термической обработки получают пригодное для взвешивания соединение, которое называется *гравиметрической* (весовой) *формой*.

По массе гравиметрической формы и ее формуле рассчитывают содержание в ней определяемого элемента (или вещества) и выражают содержание этого элемента в процентах от взятой навески.

В формулах для вычисления результатов гравиметрического анализа применяют постоянный гравиметрический множитель, называемый фактором пересчета (*F*). Он показывает, какой массе определяемого компонента соответствует 1 г гравиметрической формы.

При вычислении гравиметрического фактора необходимо учитывать стехиометрические коэффициенты в химической формуле определяемого вещества и в формуле гравиметрической формы, с тем чтобы число атомов определяемого компонента в числителе и знаменателе дроби было одинаковым:



$$F = \frac{a \cdot M(X)}{b \cdot M(\text{грав. ф.})}, \quad (3.1)$$

где  $a$  и  $b$  — числа, необходимые для уравнивания числа молей определяемого вещества в числителе и знаменателе;  $M(X)$  и  $M(\text{грав. ф.})$  — молярные массы определяемого вещества и гравиметрической формы, г/моль.

Массу определяемого компонента ( $m_X$ ) по результатам гравиметрического анализа рассчитывают по формуле

$$m_X = m_{\text{грав. ф.}} \cdot F. \quad (3.2)$$

Для вычисления массовой доли компонента ( $\omega_X$ ) в образце массой  $g$  (г) используют формулу

$$\omega_X = \frac{m_X}{g} \cdot 100\% = \frac{m_{\text{грав. ф.}} \cdot F}{g} \cdot 100\%. \quad (3.3)$$

Если навеску образца растворяют в мерной колбе вместимостью  $V_o$ , и на одно определение пипеткой отбирают аликвотную порцию раствора  $V_{\text{ал}}$ , то формулы (3.2) и (3.3) дополняются множителем  $V_o/V_{\text{ал}}$ .

## РЕШЕНИЕ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

**П р и м е р 1.** Вычислите гравиметрический фактор для определения магния, если гравиметрической формой является пирофосфат магния  $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ .

**Р е ш е н и е.** Между  $\text{Mg}$  и  $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$  существует стехиометрическое соотношение



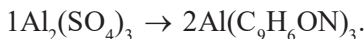
Гравиметрический фактор равен

$$F = \frac{2 \cdot M(\text{Mg})}{1 \cdot M(\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7)} = \frac{2 \cdot 24,3050}{222,553} = 0,2184.$$

**О т в е т:**  $F = 0,2184$ .

**П р и м е р 2.** Вычислите массу сульфата алюминия, которую необходимо взять для получения 0,0930 г сухого осадка оксихиолята алюминия  $\text{Al}(\text{C}_9\text{H}_6\text{ON})_3$ .

**Р е ш е н и е.** Между  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  и  $\text{Al}(\text{C}_9\text{H}_6\text{ON})_3$  существует стехиометрическое соотношение



Гравиметрический фактор равен

$$F = \frac{1 \cdot M(\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3)}{2 \cdot M(\text{Al}(\text{C}_9\text{H}_6\text{ON})_3)} = \frac{342,15}{2 \cdot 459,44} = 0,3724.$$

Массу сульфата алюминия рассчитываем по формуле (3.2):

$$m_{\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3} = m_{\text{Al}(\text{C}_9\text{H}_6\text{ON})_3} \cdot F = 0,0930 \cdot 0,3724 = 0,0346 \text{ (г)}.$$

**О т в е т:**  $m(\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3) = 0,0346 \text{ г}$ .

**П р и м е р 3.** Вычислите массу навески серного колчедана, содержащего 47,22 % серы, которую следует взять для получения 0,5155 г сульфата бария.

**Р е ш е н и е.** Гравиметрический фактор при определении серы, если гравиметрической формой является сульфат бария, равен

$$F = \frac{M(\text{S})}{M(\text{BaSO}_4)} = 0,1374.$$

Массовая доля серы связана с массой гравиметрической формы и массой навески серного колчедана формулой (3.3):

$$\omega_{\text{S}} = \frac{m_{\text{BaSO}_4} \cdot F}{g} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Отсюда

$$g = \frac{m_{\text{BaSO}_4} \cdot F}{\omega_{\text{S}}} \cdot 100\% = \frac{0,5155 \cdot 0,1374}{47,22} \cdot 100 \text{ \%} = 0,1500 \text{ (г)}.$$

**О т в е т:**  $g = 0,1500 \text{ г}$ .

## КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

**416–445.** Вычислите фактор пересчета (гравиметрический фактор).

№ п/п	Определяемое вещество	Гравиметрическая форма
416.	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	$\text{BaSO}_4$
417.	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{NaCl}$
418.	$\text{CaCO}_3$	$\text{CaSO}_4$
419.	$\text{CaO}$	$\text{CaCO}_3$
420.	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	$\text{CaO}$
421.	$\text{FeO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
422.	$\text{FeSO}_4$	$\text{Fe}(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_2\text{N}_2)_3$
423.	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$
424.	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{P}_2\text{O}_5 \cdot 24\text{MoO}_3$
425.	$\text{P}_2\text{O}_5$	$(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{MoO}_3$
426.	$\text{Pb}_3\text{O}_4$	$\text{PbSO}_4$
427.	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
428.	$\text{CuO}$	$\text{CuSCN}$
429.	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{PtCl}_6$
430.	$\text{Ag}_2\text{O}$	$\text{AgCl}$
431.	$\text{MoO}_3$	$(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{MoO}_3$
432.	$\text{MgO}$	$\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$
433.	$\text{C}_2\text{HCl}_3$	$\text{AgCl}$
434.	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{Br}$	$\text{AgBr}$
435.	$(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{SO}$	$\text{BaSO}_4$
436.	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}(\text{C}_9\text{H}_6\text{ON})_3$

О к о н ч а н и е   т а б л и ц ы

№ п/п	Определяемое вещество	Гравиметрическая форма
437.	CdO	$\text{Cd}_2\text{P}_2\text{O}_7$
438.	$\text{Co}_3\text{O}_4$	$\text{CoSO}_4$
439.	LiOH	$\text{Li}_3\text{PO}_4$
440.	$\text{K}_3\text{PO}_4$	$\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$
441.	$\text{ZnCl}_2$	$\text{ZnHg}(\text{SCN})_4$
442.	KCN	AgCN
443.	$\text{CuSO}_4$	$\text{Cu}(\text{C}_9\text{H}_6\text{ON})_2$
444.	$\text{KMnO}_4$	$\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$
445.	$\text{NH}_4\text{F}$	$\text{PbClF}$

**446.** Рассчитайте массу пирита, содержащего 32 % серы, которую необходимо взять для анализа, чтобы получить 0,3624 г сульфата бария.

**447.** Из навески апатито-нефелиновой руды массой 0,0500 г, содержащей кристаллический апатит  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaF}_2$ , получили 0,4508 г осадка  $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{MoO}_3$ . Вычислите массовую долю  $\text{P}_2\text{O}_5$  в руде.

**448.** Из раствора соли калия получено 0,1681 г перхлората калия  $\text{KClO}_4$ . Вычислите массу калия в растворе.

**449.** Из образца технического сульфата цинка массой 1,0350 г получили 0,8310 г пирофосфата цинка. Вычислите массовую долю сульфата цинка в техническом продукте.

**450.** Вычислите массу фосфорита, содержащего 18,5 % оксида фосфора (V), необходимую для получения 0,2915 г пирофосфата магния  $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ .

**451.** Из навески технического сульфида натрия массой 0,1500 г после окисления сульфида до сульфата получили 0,4125 г сульфата бария. Вычислите массовую долю серы в исследуемом образце.

**452.** Из 25,0 см<sup>3</sup> раствора медь выделена в виде осадка сульфида меди (I), масса которого после высушивания составила 0,1543 г. Рассчитайте массовую концентрацию (г/дм<sup>3</sup>) меди в растворе.

**453.** Из навески криолита массой 0,5430 г получили 0,0971 г оксида алюминия. Вычислите массовую долю гексафтороалюмината натрия (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) в криолите.

**454.** Вычислите массу технического хлорида бария, содержащего 98 % дигидрата хлорида бария, которую следует взять для получения 0,3055 г сульфата бария.

**455.** Вычислите массовую долю оксида железа (II) в образце технического железного купороса, если из навески массой 0,5750 г в результате анализа получили 0,1591 г оксида железа (III).

**456.** Вычислите массу осадка диоксида свинца, которая может быть получена при обработке 0,30 г металлического свинца.

**457.** Из навески фосфорита массой 0,2500 г получили 0,1800 г пирофосфата магния Mg<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>. Вычислите массовую долю оксида фосфора (V) в фосфорите.

**458.** Вычислите массу химически чистого железа, из которой был получен осадок оксида железа (III) массой 0,4550 г.

**459.** Вычислите массовую долю хлорида натрия в техническом образце сульфата натрия, если из навески образца массой 0,4500 г было получено 0,0196 г хлорида серебра.

**460.** Вычислите массу вещества, содержащего 60 % железа, которую необходимо взять для анализа, чтобы масса прокаленного осадка оксида железа (III) была равна 0,1800 г.

**461.** Из навески пробы Челябинского метеорита массой 1,0000 г после соответствующих операций получено 0,8447 г диоксида кремния. Рассчитайте массовую долю кремния в пробе метеорита.

**462.** Вычислите массу молибдата свинца PbMoO<sub>4</sub>, полученного в результате обработки 0,1679 г молибдата аммония избытком нитрата свинца (II).

**463.** Вычислите массовую долю железной окалины Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, если из навески руды массой 0,5000 г получили 0,3989 г оксида железа (III).

**464.** После соответствующей обработки образца чугуна получили осадок сульфида меди (II) массой 0,1084 г. Вычислите массу серы в образце чугуна.

**465.** Для определения лития навеску силикатной породы массой 0,9500 г обработали смесью фтороводородной и хлороводородной кислот. После извлечения хлорида лития безводным ацетоном раствор выпарили, остаток прокалили и превратили в сульфат лития, масса которого составила 0,3401 г. Вычислите массовую долю лития в силикатной породе.

**466.** Рассчитайте массу цемента, содержащего 28 % оксида магния, которую следует взять для получения 0,2550 г оксихинолята магния  $\text{Mg}(\text{C}_9\text{H}_6\text{ON})_2$ .

**467.** Для анализа производственных сточных вод на содержание сульфата отобрали пробу объемом 250,0 см<sup>3</sup> и осадили сульфат бария. Масса прокаленного осадка сульфата бария равна 0,0526 г. Вычислите массовую концентрацию (мг/дм<sup>3</sup>)  $\text{SO}_4^{2-}$  в пробе.

**468.** Рассчитайте массу осадка  $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , выделенного из раствора, содержащего 0,1788 г кальция.

**469.** Вычислите массовую долю кобальта в сплаве, если из навески образца массой 0,2520 г после осаждения кобальта  $\alpha$ -нитрозо- $\beta$ -нафтолом получили прокаленный осадок  $\text{Co}_3\text{O}_4$  массой 0,1214 г.

**470.** Вычислите массу железной окалины  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , которую следует взять для получения 0,2460 г оксида железа (III).

**471.** Вычислите массовую долю  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  в образце технического железного купороса, если из навески массой 0,6133 г в результате анализа получили 0,1697 г оксида железа (III).

**472.** Из 25,0 см<sup>3</sup> раствора соли меди (II) получен осадок тиоцианата (роданида) меди (I) массой 0,2358 г. Вычислите массовую концентрацию (г/дм<sup>3</sup>) меди в растворе.

**473.** Из навески фосфорита массой 0,2000 г получили 0,2307 г сульфата кальция. Вычислите массовую долю оксида кальция в фосфорите.

**474.** Рассчитайте массу химически чистого сульфида железа (II), из которой получен осадок сульфата бария массой 0,4541 г.

**475.** Вычислите массовую долю сульфата натрия в техническом образце сульфата натрия, если из навески образца массой 0,4000 г было получено 0,5751 г сульфата бария.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

*Лурье Ю. Ю.* Справочник по аналитической химии. М., 2007.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

*Васильев В. П.* Аналитическая химия : в 2 кн. / В. П. Васильев. М. : Дрофа, 2007.

*Васильев В. П.* Аналитическая химия : сб. вопросов, упражнений и задач / В. П. Васильев, Л. А. Кочергина, Т. Д. Орлова ; под ред. В. П. Васильева. М. : Дрофа, 2003.

*Дорохова Е. Н.* Задачи и вопросы по аналитической химии / Е. Н. Дорохова, Г. В. Прохорова. М. : Мир, 2001.

Задачник по аналитической химии / Н. Ф. Клещев, Е. А. Алферов, Н. В. Базалей и др. ; под ред. Н. Ф. Клещева. М. : Химия, 1993.

*Коренман Я. И.* Задачник по аналитической химии. Титриметрические методы анализа / Я. И. Коренман, П. Т. Суханов, С. П. Калинкина. Воронеж : Воронеж. гос. технол. акад., 2001.

*Кристиан Г.* Аналитическая химия : в 2 т. / Г. Кристиан ; пер. с англ. М. : БИНОМ, Лаборатория знаний, 2009.

*Лурье Ю. Ю.* Справочник по аналитической химии / Ю. Ю. Лурье. М. : ИД «Альянс», 2007.

*Пилипенко А. Т.* Аналитическая химия : в 2 кн. / А. Т. Пилипенко, И. В. Пятницкий. М. : Химия, 1990.

*Харитонов Ю. Я.* Аналитическая химия (аналитика) : в 2 кн. / Ю. Я. Харитонов. М. : Высш. шк., 2003.

*Цитович И. К.* Курс аналитической химии / И. К. Цитович. М. : Высш. шк., 1994.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
1. ХИМИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ .....	14
Основные положения .....	14
<i>Решение типовых задач</i> .....	16
Равновесие реакций комплексообразования в водных растворах .....	17
<i>Решение типовых задач</i> .....	19
<i>Контрольные задания</i> .....	21
Равновесие окислительно-восстановительных реакций .....	24
<i>Решение типовых задач</i> .....	26
<i>Контрольные задания</i> .....	28
Гетерогенное равновесие в системе осадок — раствор .....	30
<i>Решение типовых задач</i> .....	34
<i>Контрольные задания</i> .....	39
2. ТИТРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА .....	46
Способы выражения концентрации раствора .....	46
<i>Решение типовых задач</i> .....	49
<i>Контрольные задания</i> .....	51
Приготовление рабочих растворов .....	53
<i>Решение типовых задач</i> .....	54
<i>Контрольные задания</i> .....	60
Вычисление результатов титриметрических определений .....	66
<i>Решение типовых задач</i> .....	69
<i>Контрольные задания</i> .....	81
Построение кривых кислотно-основного титрования .....	96
<i>Титрование сильных однопротонных кислот</i> .....	97
<i>Титрование сильных оснований</i> .....	98
<i>Титрование слабых однопротонных кислот</i> .....	99
<i>Титрование слабых оснований</i> .....	101
<i>Выбор индикатора в кислотно-основном титровании</i> .....	102
<i>Индикаторные погрешности кислотно-основного титрования</i> ...	104



<i>Решение типовых задач</i> .....	105
<i>Контрольные задания</i> .....	114
3. ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД АНАЛИЗА .....	120
<i>Решение типовых задач</i> .....	121
<i>Контрольные задания</i> .....	123
Библиографические ссылки .....	127
Список рекомендуемой литературы .....	127

Учебное издание

# АНАЛИТИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Практикум

Составитель

Лакиза Наталья Владимировна

Зав. редакцией *М. А. Овечкина*

Редактор *В. И. Попова*

Корректор *В. И. Попова*

Компьютерная верстка *Г. Б. Головиной*

План изданий 2013 г. Подписано в печать 06.12.13.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times.

Уч.-изд. л. 6,8. Усл. печ. л. 7,67. Тираж 160 экз. Заказ 2431.

Издательство Уральского университета

620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ

620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4

Тел.: + (343) 350-56-64, 350-90-13

Факс +7 (343) 358-93-06

E-mail: [press-urfu@mail.ru](mailto:press-urfu@mail.ru)

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК